



Jagten på universets gåder...

Rejsen til det ukendte...

Standardmodellens herligheder

“Og dens vitale mangler”

Partikelfysikkens **Hvorfor? - Hvordan? - Hvad?**

Jørgen Beck Hansen  
Niels Bohr Institutet  
Februar 2025

# Hvor kommer det hele fra ?



# Begrebet "Grundelementer"

I Aristoteles verdenbillede var der 4 grundelementer



(c) Andy Brice 1998

ELEMENTS			
Hydrogen	1	Strontian	86
Azote	5	Barites	68
Carbon	46	Iron	56
Oxygen	7	Zinc	66
Phosphorus	9	Copper	64
Sulphur	16	Lead	207
Magnesia	24	Silver	197
Lime	28	Gold	197
Soda	28	Platina	197
Potash	40	Mercury	200

I 1808 opskrev John Dalton (1808) mange af de kendte elementer ordnet efter deres egenskaber (vægt- masse)

# Det Periodiske System

Grundstofferne grupperes i familier med lignende egenskaber (f.eks. ædelgasser He, Ne etc.).

**Periodic Table of the Elements**

1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57 * La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89 + Ac	104 Rf	105 Ha	106 106	107 107	108 108	109 109	110 110								

58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

\* Lanthanide Series  
+ Actinide Series

Det Periodiske System:  
Mendeleev (1869)



Familier/periodicitet  
Indre struktur med simple  
byggesten

# Jagten på Demokrit's atom...

Atomisme: Ideen om at alle objekter i universet er opbygget af meget små udelelige byggestene - **atomer**. Atom stammer fra det græske ord **atomos**, som betyder udelelig.



Navn Demokritos

Født ca. 460 f.k.

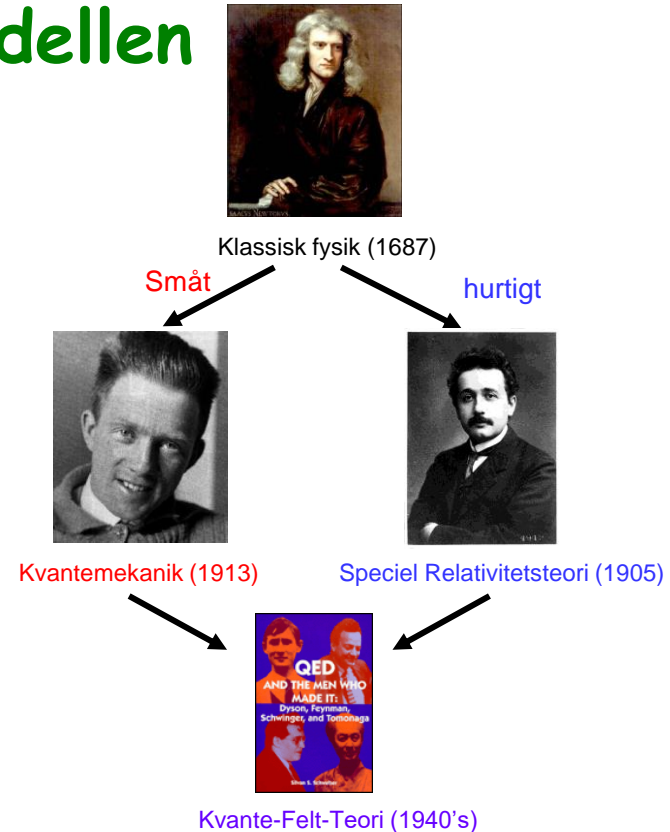
Død ca. 370 f.k.

"Men: Kan stof deles udeleligt?"

# Vores nuværende viden om partiklernes verden: **Standard-Modellen**

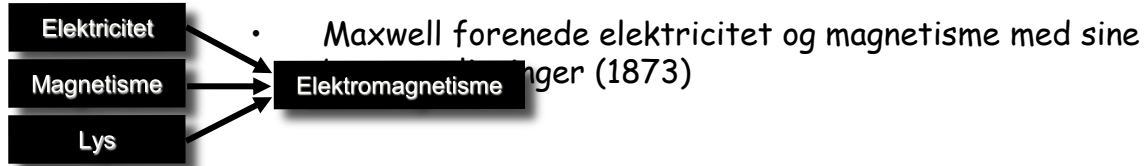
Det repræsenterer en  
kæmpe intellektuel  
indsats i anden halvdel af  
det 20'ende århundrede

Teorien er formuleret  
indenfor rammerne af  
**Relativistisk Kvante-  
Felt-Teori**



# Partikelfysikkens paradigme: Foreningen af teorier

- Op gennem tiden er der sket en stadig forening af teorier



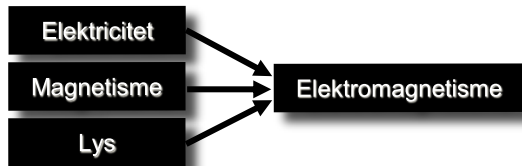
A collage of four black and white portraits of physicists: Paul Dirac (top left), Richard Feynman (top right), Julian Schwinger (bottom left), and Sin-Itiro Tomonga (bottom right).

- Dirac introducerede elektron-teori (1926)
- Teoretisk arbejde af Feynman, Schwinger og Tomonga resulterede i en teori for elektroner og fotoner med meget præcise forudsigelser

$$\begin{aligned} \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{B} &= \mu_0 \mathbf{j} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \\ &= \rho / \epsilon_0 \\ &= 0 \end{aligned}$$

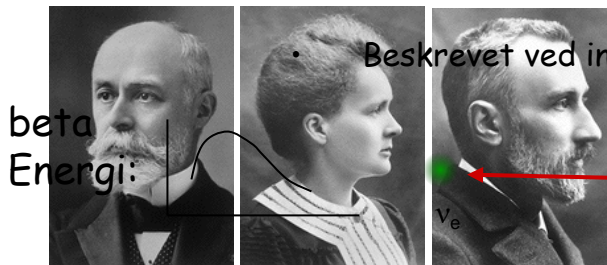
# Partikelfysikkens paradigme: Foreningen af teorier

- Op gennem tiden er der sket en stadig forening af teorier

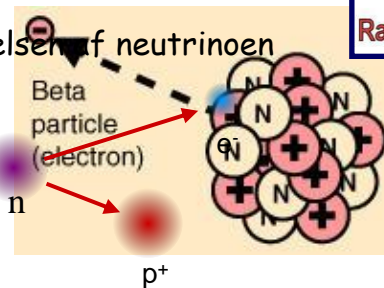


- Opdagelsen af radioaktivt henfald

- Becquerel: uranium (1896)
- Marie og Pierre Curie: radium (1898)



- Beskrevet ved indførelsen af neutrinoen





# Interlude: Neutrinoens fødsel



Wolfgang Pauli

Offener Brief an die Gruppe der Radioaktiven bei der  
Gauvereins-Tagung zu Tübingen.

Abschrift

Physikalisches Institut  
der Eidg. Technischen Hochschule  
Zürich

Zürich, 4. Dez. 1930  
Ulriestraße

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Überbringer dieser Zeilen, den ich huldvollst  
ansuhren bitte, Ihnen das näheren auseinandersetzen wird, bin ich  
angesichts der "falschen" Statistik der  $\beta$ - und  $\beta$ -6 Kerne, sowie  
des kontinuierlichen  $\beta$ -Spektrums auf einen verzweifeltsten Ausweg  
verfallen um den "Wechselgatz" (1) der Statistik und den Energiegatz  
zu retten. Nämlich die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrale  
Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren,  
welche den Spin  $1/2$  haben und das Ausschliessungsprinzip befolgen und  
sich von Lichtquanten ausserdem noch dadurch unterscheiden, dass sie  
nicht mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen  
müsste von derselben Grössenordnung wie die Elektronenmasse sein und  
jedenfalls nicht grösser als 0,01 Protonenmasse.- Das kontinuierliche  
 $\beta$ -Spektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, dass beim  
 $\beta$ -Zerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert  
wird, derart, dass die Summe der Energien von Neutron und Elektron  
konstant ist.

# Opdagelsen af neutrinoen

1956: discovery of the neutrino

Det tog 26 år at opdagde neutrinoen.  
Cowan og Reines anbragte en detektor tæt på en reaktor i South Carolina og observerede det inverse beta henfald (få hændelser/time)  
Reaktoren gav



$10^{19}$  neutrinos/sec

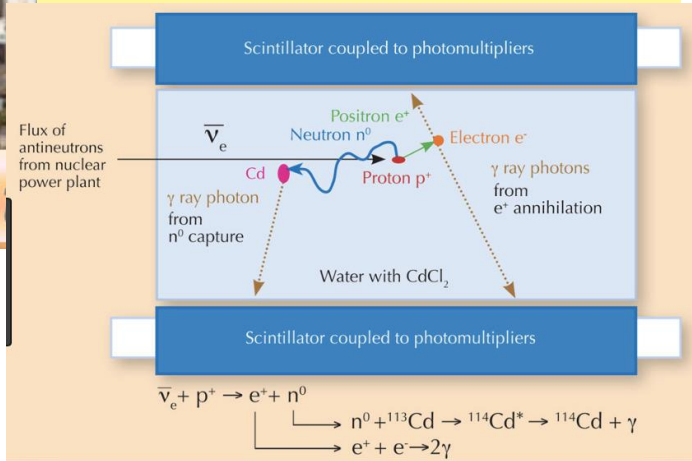
Neutrinoen eksisterer!



5  $\mu$ sekund forsinkelse

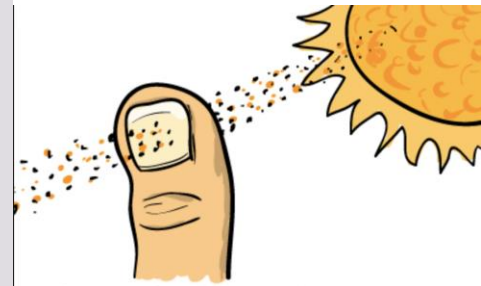


n-capture by cadmium

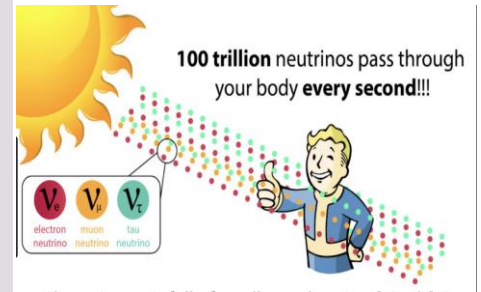


# Neutrinoen

- Neutrinoer er **fundamentale partikler**
- Neutrinoer er **Spøgelses-partikler**
- Trillions ( $10^{12}$ ) af neutrinoer passerer per sekund gennem din krop I gennem hele livet! De kommer fra solen
- Neutrinoer kræver et **lys-year af bly** ( $\sim 10^{13}$  km) for at kunne stoppes med 50% chance
- Der er **en milliard neutrinoer for hvert atom i Universet**. Der er  $\sim 3 \cdot 10^8$  neutrinoer per kubik meter - "relic neutrinos"
- **Det enorme antal må betyde at de er vigtige.....**  
**Men de er svære at fange**

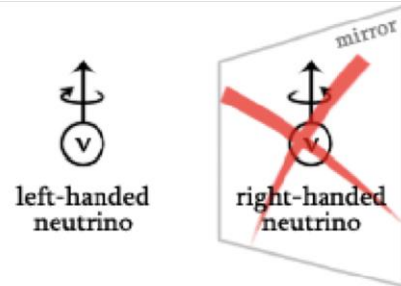


**FACT:** about 65 million neutrinos pass through your thumbnail every second. Learn Something New Every Day LSNEED.com



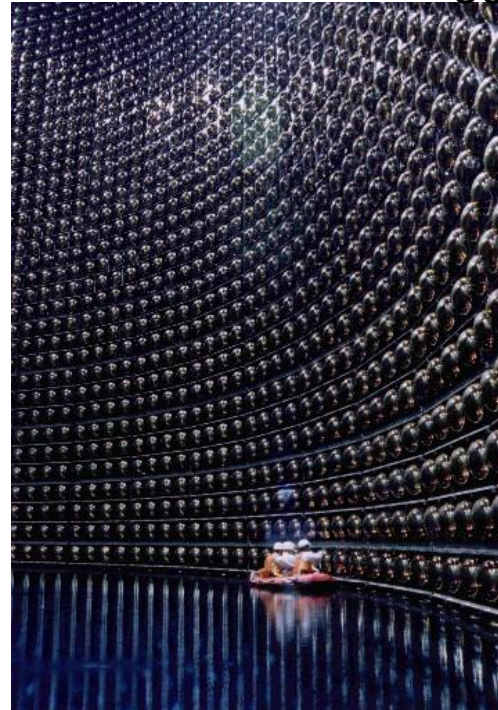
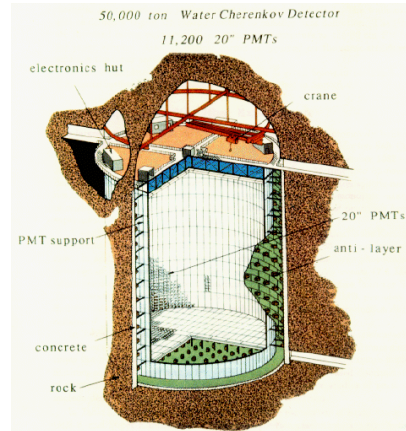
**100 trillion** neutrinos pass through your body **every second!!!**

$\nu_e$  electron neutrino  
 $\nu_\mu$  muon neutrino  
 $\nu_\tau$  tau neutrino



# Kunsten af "fange" den flygtige neutrino!

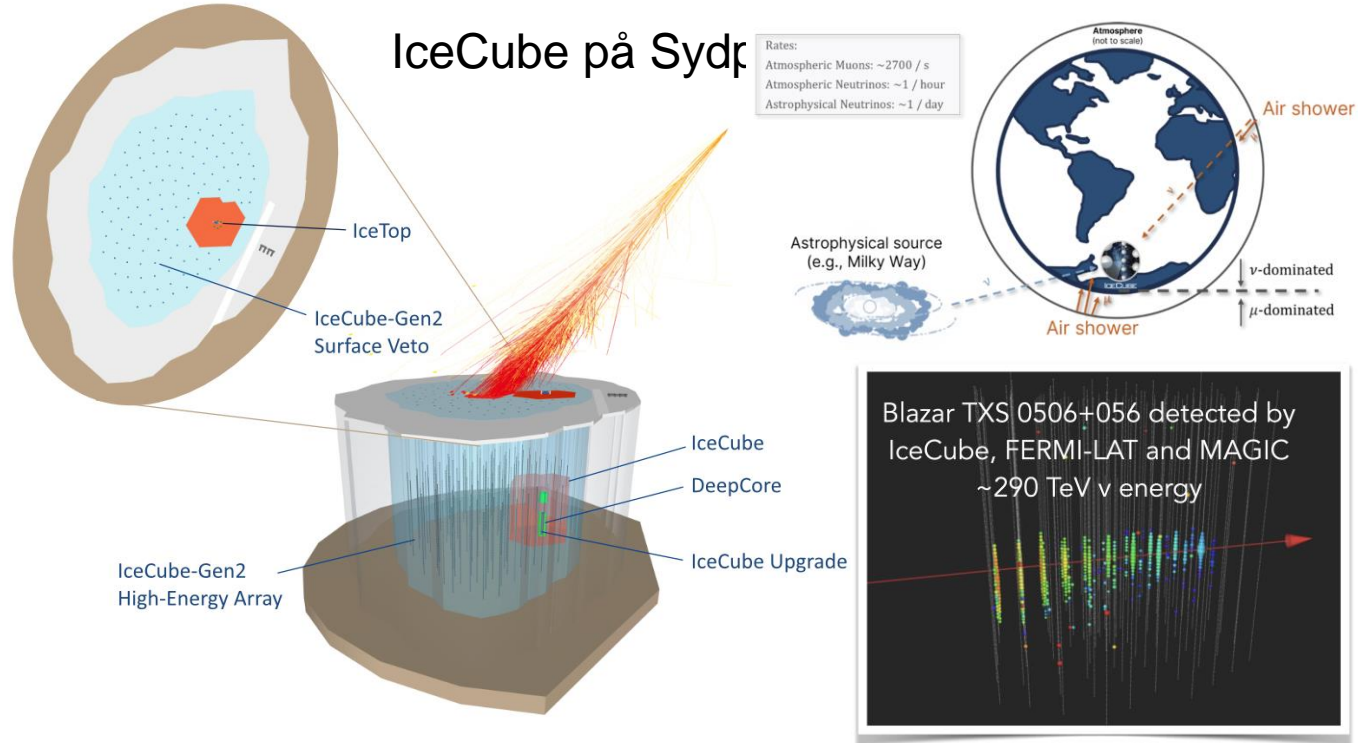
- Kamiokande og Super-Kamiokande  
(Masatoshi Koshiba, Rochester PhD 1955, Nobel Laureate 2002)



50 k-ton

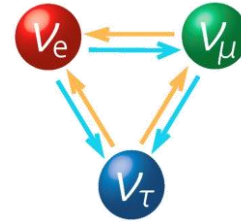
- Der er planlagt en HYPER-kamiokande (x4) med opstart i 2027

# Verden største neutrino observatorium?

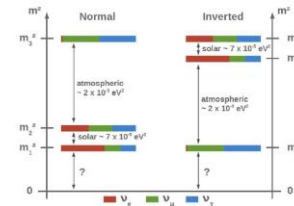


# Nyt fra neutrino-fronten

- Neutrinoer har masse - gennembrud i partikelfysik → SM kan ikke forklare hvordan
- Neutrinoer oscillerer - skifter "ham"
  - Undersøges intenst
  - næste generation af detektorer og kraftige (anti-) neutrino-stråler er nødvendige
- Neutrinomassemåling "rundt om hjørnet"
  - Er de Majorana- eller Dirac-neutrinoer?
  - Hvilken neutrino er den letteste? Massehierarki
- Ny æra for højenergi-neutrinodetektion (og multi-messenger astronomi)

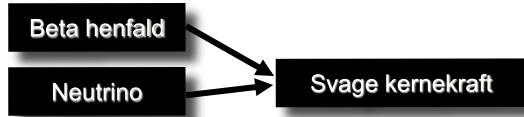
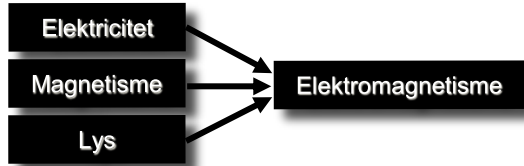


$$m_{\nu_e}^2 = \sum_i |U_{ei}|^2 \cdot m_{\nu_i}^2$$



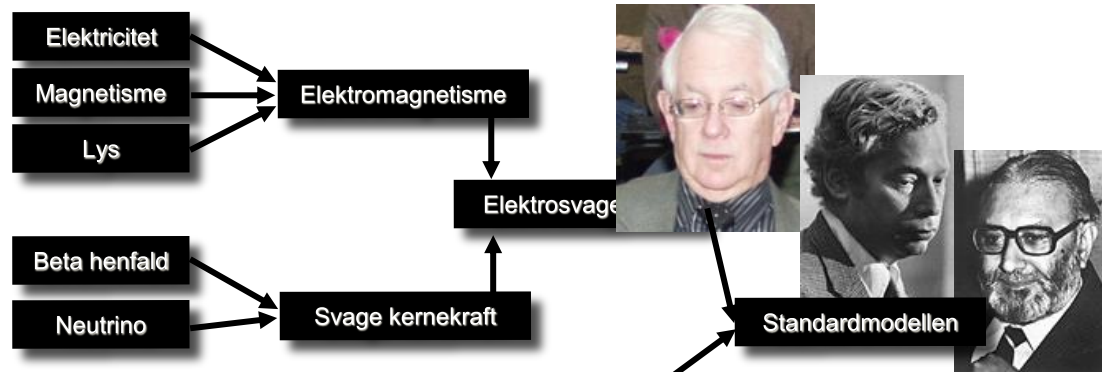
# Partikelfysikkens paradigme: Foreningen af teorier

- Op gennem tiden er der sket en stadig forening af teorier



# Partikelfysikkens paradigme: Foreningen af teorier

- Op gennem tiden er der sket en stadig forening af teorier



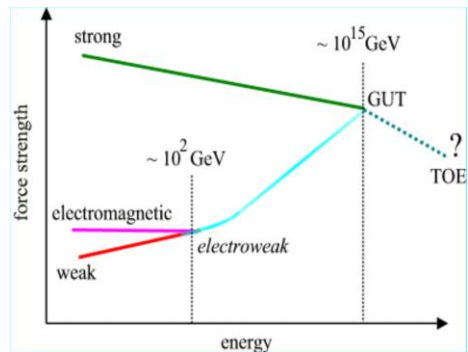
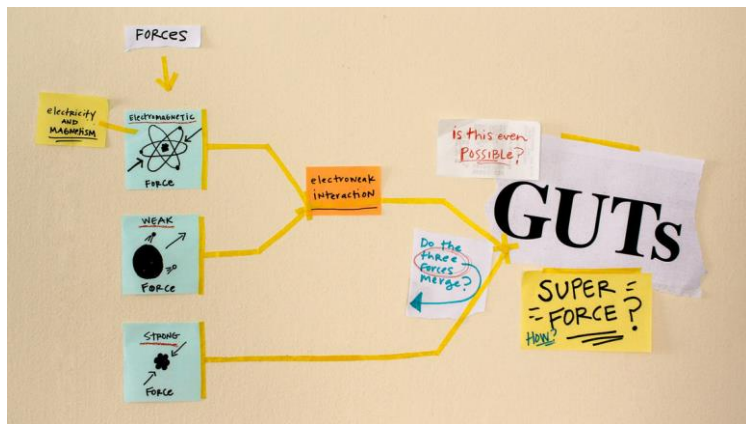
- W, Weinberg og Salam (1967/1968) beskrev hvorledes  
 (elektromagnetisme og svag kernekraft af fotonen) og den svage kernekraft  
 krævede en teori, hvor den svage kernekraft blev formidlet  
 af tre partikler:  $W^+$ ,  $W^-$  og  $Z^0$
- Disse partikler blev observeret ved CERN i 1983





# No GUT, no glory

- Kræfternes styrkeforhold er ikke konstant!
- Antyder at der findes en **forenet kraft** som virkede umiddelbart efter Universets fødsel:



- Men så lever stof ikke evigt!  
**Protoner går i stykker**  
**Diamanter varer ikke evigt**



# Hov - Hvad med tyngdekraften?

Tyngdekraften mellem 2 elektroner er **42**

**størrelsesordener** svagere end den elektriske kraft imellem dem

-  $10^{42} =$   
1,000,000,000,000,000,000,0  
00,000,000,000,000,000,000,000,  
000

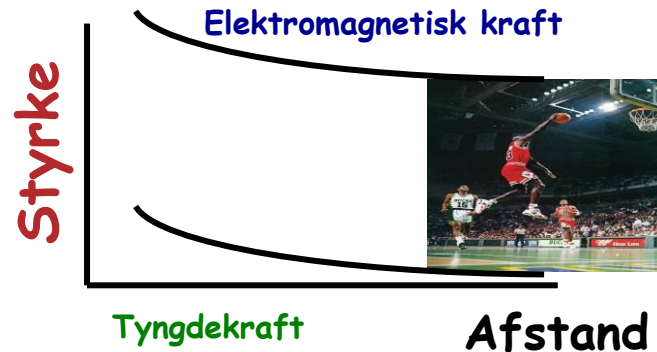
Alle de andre kræfter har omkring den samme styrke som den elektriske kraft

**Der må være noget vi ikke har forstået**

Opdagelsen af tyngdebølger: Håb for **Gravitionen**

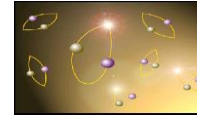


$$F_C = k_c \frac{q_e q_e}{r^2}$$

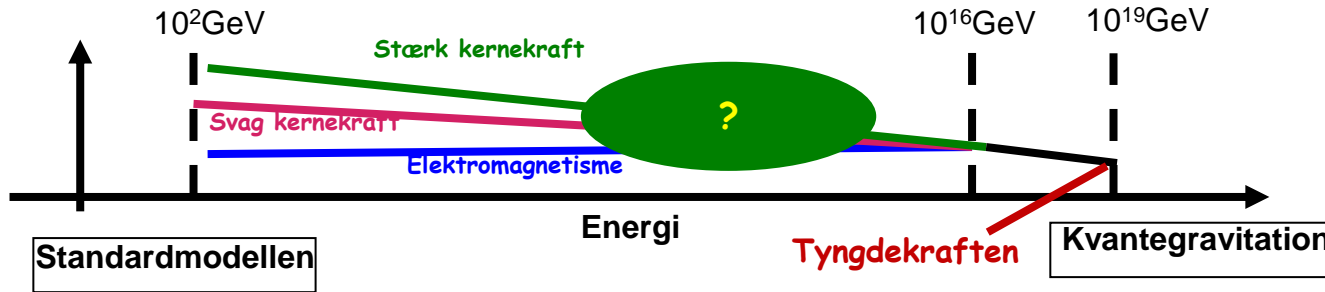


$$F_G = G_N \frac{m_e m_e}{r^2}$$

# Einstein's drøm ... eller mareridt?



Foreningen af naturkræfterne - hvorfor er de ikke lige stærke??



Standardmodellen forklarer **IKKE** tyngdekraften

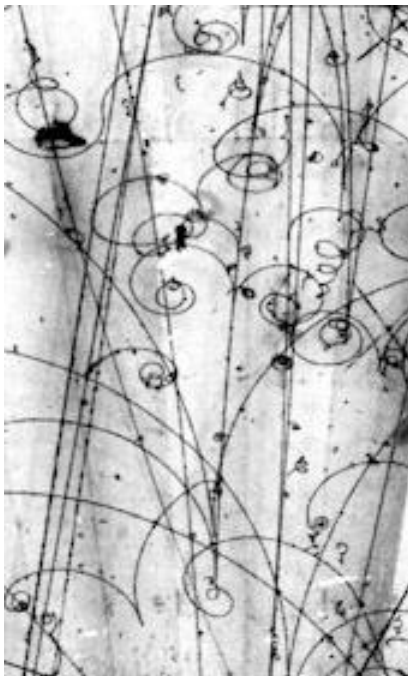


Derfor **VED** vi at modellen ikke kan være den endelige teori og noget nyt skal dukke op

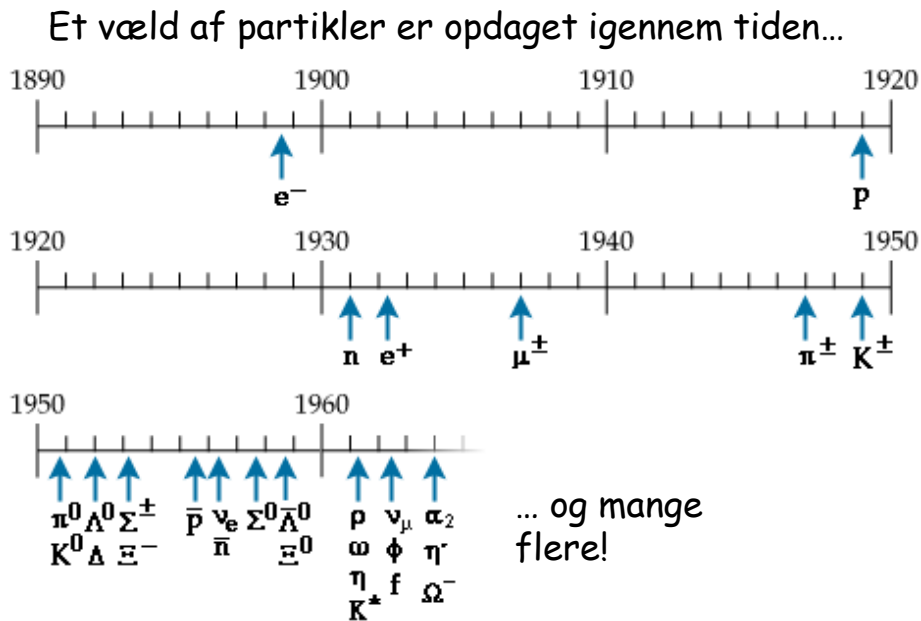
**Standardmodel** + **Relativitetsteori** = ?



# Nye Typer af Stof...



[Fermilab](#): Bubble Chamber Photo



Mere end 200 partikler...

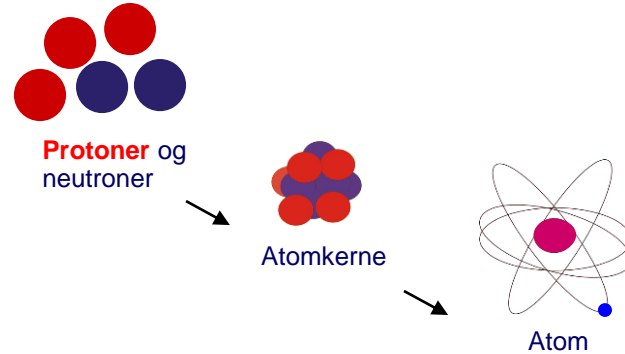
Der må være et system...

# Standardmodellen: Det nye periodiske system

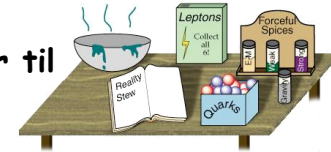
Vores forståelse af universets opbygning og virkemåde på den mindste skala er idag samlet i partikelfysikkens Standardmodel

Kvarker	u	c	t
	d	s	b
Leptoner	e	$\mu$	$\tau$
	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$
Stof partikler (fermioner - spin $\frac{1}{2}$ )			

Atomer består af protoner, neutroner og elektroner




Vi har nu alle ingredienser til at opbygge vores verden!




“Hvem bad om det?” - Isidor I. Rabi (1936)

# Partiklernes egenskaber - Kvantetal

## Spilleregler - Bevarelse

- Historisk bestemt ud fra reaktioner mellem partiklerne
  - Elektrisk Ladning
  - Baryontal (B)
  - Strangeness (S)
  - Charmness (C)
  - Beauty (B')
  - Truth (T)

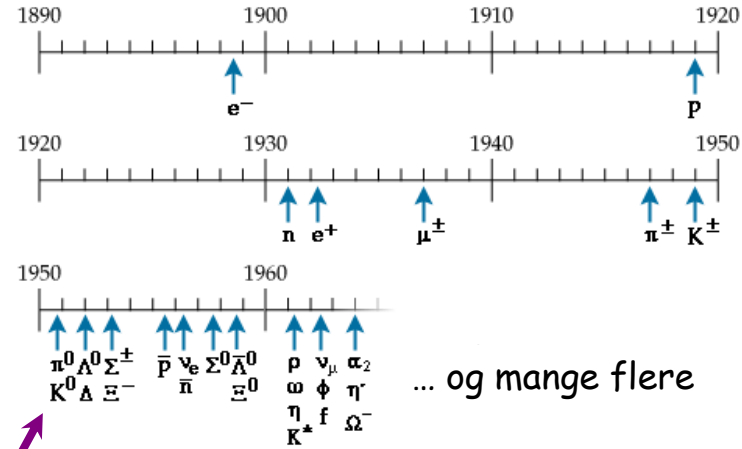
**Nul** for Leptoner

  - Elektron-leptontal ( $L_e$ )
  - Muon-leptontal ( $L_\mu$ )
  - Tau(on)-leptontal ( $L_\tau$ )

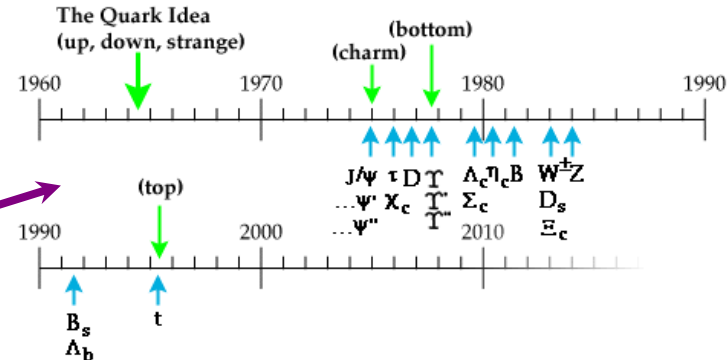
**Nul** for kvarker
- Elektrisk ladning, Baryontal og alle Leptontal er bevaret i **ALLE** kendte vekselvirninger og processer
- Strangeness, Charm, Beauty og truth er **IKKE** bevaret i den svage vekselvirkning
- Anti-partiklerne har **modsat fortegn!**

# Tilbage til: Zoo af nye partikler

- Kollisioner mellem elektroner og kerner i kosmiske stråler og ved partikel-acceleratorer startende i 1930'erne førte til opdagelsen af mange nye partikler
- Nogle var forudsagt; mange andre var uventede
- Først regnede man dem alle for elementære
- Fra 1960'erne forklaring gennem **Kvark-modellen**

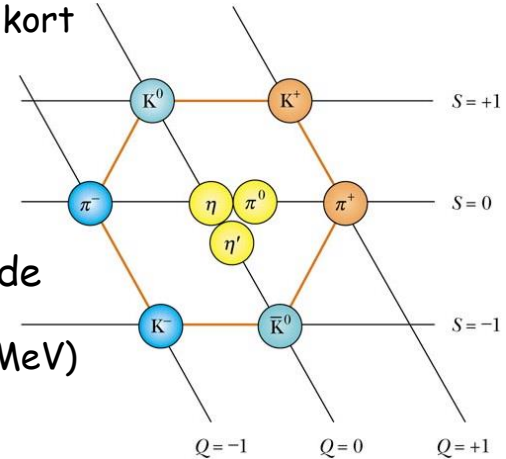


... og mange flere



# Kvarkmodellen

- Slutning af 1950'erne - begyndelsen af 1960'erne
  - Opdagelse af many nye partikler med meget kort levetid
  - Langt over 100 partikler
  - Kollektivt benævnt "hadroner"
- Tidligt indså man at disse nye partikler havde et mønster
  - Pioner:  $\pi^+$ (140 MeV)  $\pi^-$ (140 MeV)  $\pi^0$ (135 MeV)
  - Kaoner:  $k^+$ (496 MeV)  $k^-$ (496 MeV)  $k^0$ (498 MeV)

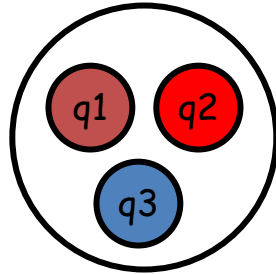


- Gell-Mann, Nakano og Nishijima: Partiklernes ladning kunne relateres til andre egenskaber (kvantetal)



# Hadroner

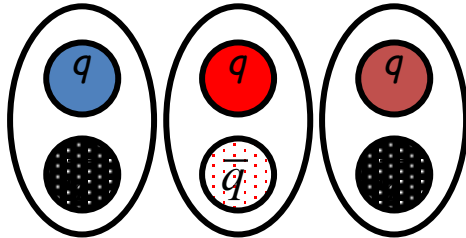
To klasser af hadroner tilladt i kvarkmodellen:



**BARYONE**  
R

Eksempler:

proton  $\equiv uud$  ; neutron  $\equiv udd$



**MESONE**  
R

Eksempler:

• Pioner

$\pi^+ \equiv u\bar{d}$  ;  $\pi^- \equiv \bar{u}d$  ;  $\pi^0 \equiv (d\bar{d} - u\bar{u})/\sqrt{2}$

• Kaoner

$K^- \equiv s\bar{u}$  ;  $\bar{K}^0 \equiv s\bar{d}$  ;  $K^+ \equiv \bar{s}u$  ;  $K^0 \equiv \bar{s}d$

Anti-baryoner består tilsvarende af anti-kvarker

Anti-mesoner får ombyttet kvark  $\leftrightarrow$  anti-kvark

Man har søgt efter andre mulige kombinationer

- indtil videre uden succes

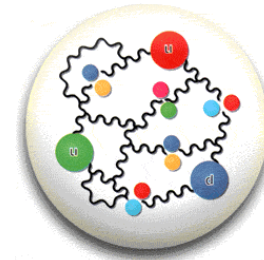
# Farveladning - kvantetal

- For at passe med kvark modellen, er det nødvendigt med tre forskellige farveladninger, benævnt:

Rød, Grøn og Blå

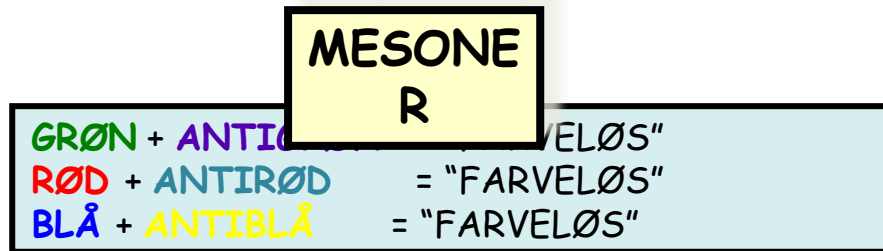
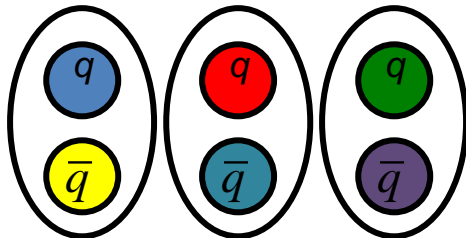
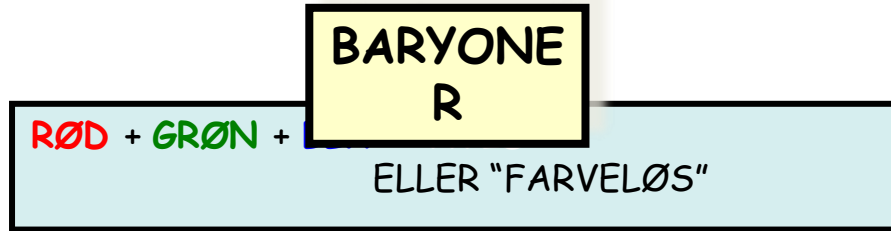
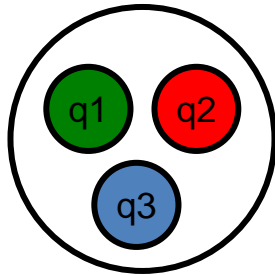
- Navnene angiver matematiske frihedsgrader og har INTET med synlige farver at gøre (men drager nytte af analogier fra farvelæren)
- Kvarker er bundet sammen i en proton (hadron), ved at udveksle en voldsom masse gluoner og skaber derved et farvefelt stærkt nok til at overvinde den elektriske frastødning mellem kvarkerne

“Protonen består af en gigantisk suppe af gluoner og ekstra (anti)-kvarker”



# Tilbage til kvarkmodellen...

Den stærke kraft - kraften mellem farveladninger - tillader kun "farveløse" frie partikler:



Alle hadroner opdaget til dags dato er farveløse..

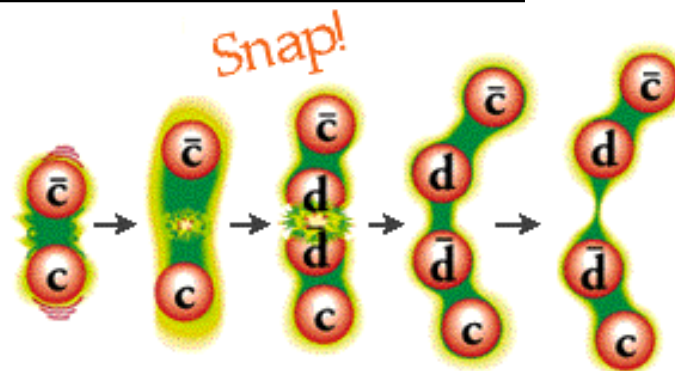
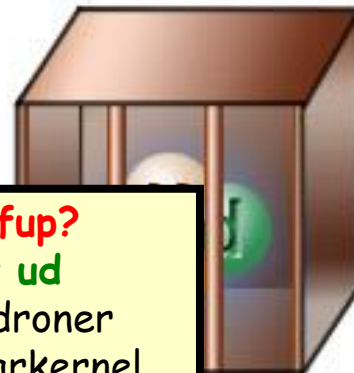
# Kvarkernes evige fangeskab

- Den stærke kraft bliver stærkere ved store afstande
- Partikler med farve-ladning kan derfor ikke isoleres
- Kvark
- had

Derfor

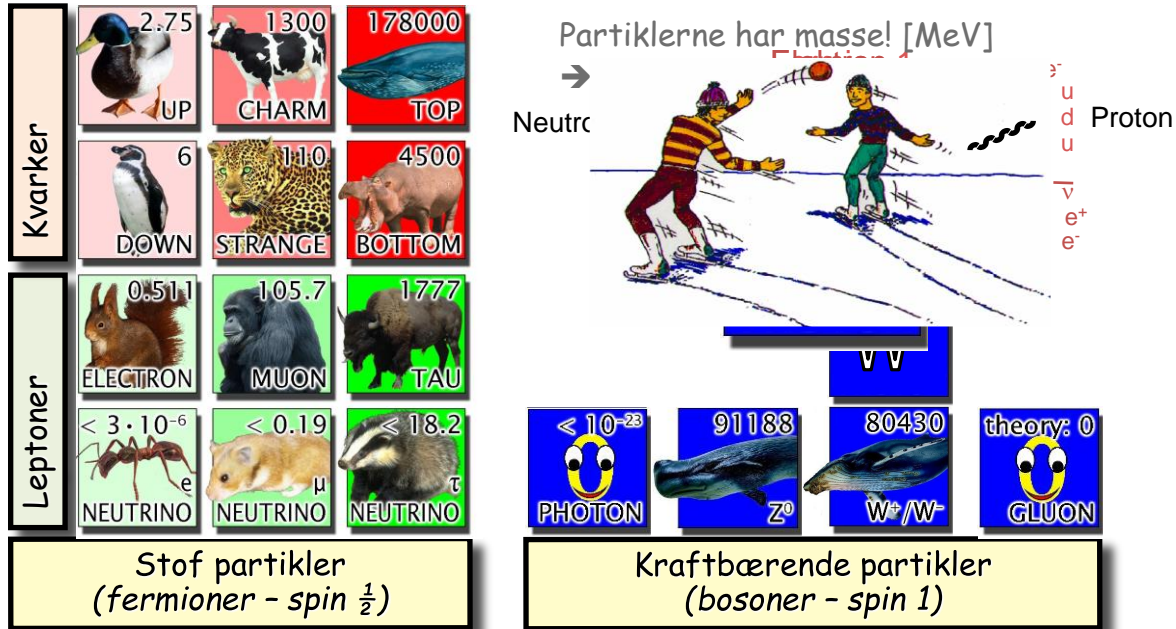
**Ikke se en kvark? Men er det så ikke fup?**  
Nej - det er **eksperimentelt bekræftet ud over enhver tvivl** at protonen og andre hadroner består af dele med egenskaber magen til kvarkerne!  
Ydermere viser eksperimenterne at der er **3** farver!

- Kvark  
gluoner
- Hvis en kvark trækkes væk fra sin nabo, strækkes farve-feltet mellem de to
- Tilsidst bliver energien i farvefeltet så stor at nye kvark-antikvark-par dannes i feltet



# Standardmodellen: Hvad holder det sammen?

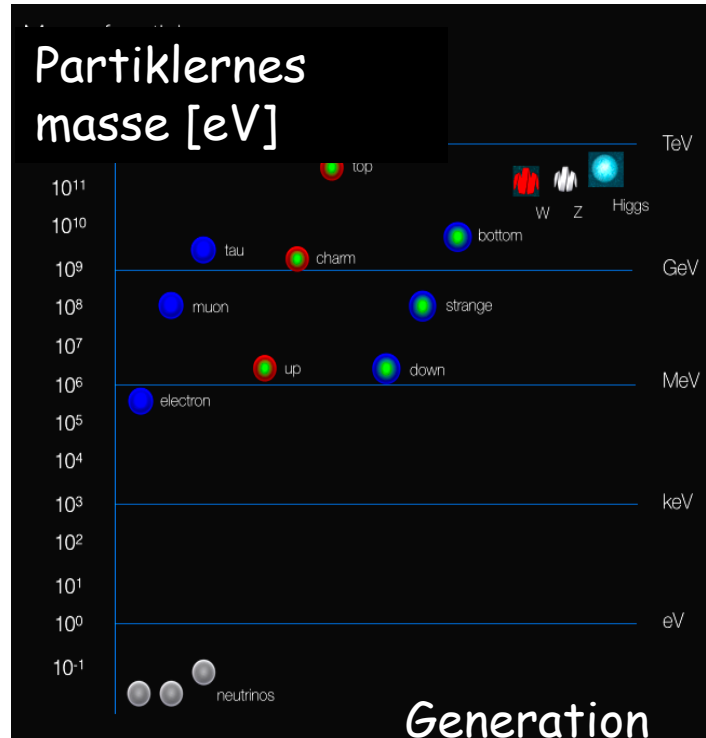
Partiklerne er bundet sammen og vekselvirker via forskellige kræfter - det sker gennem udveksling af kraftbærende partikler



- Komponenter og teori er i det store hele forstået
- Underliggende for al fysik, astronomi, kemi og liv!
- **Næsten alt** er testet med høj præcision gennem 40 år
- Tyngdekraften ignoreres, men tilskrives en uopdaget partikel: Gravitonen

$$\Delta x = \hbar c / Mc^2$$

Men hvad bestemmer partiklernes specifikke masse?



Vi ved det ikke men der er tydeligt et mønster - og kræfterne spiller i  
**Og universet er fin-justeret: Kun disse værdier for masserne virke**

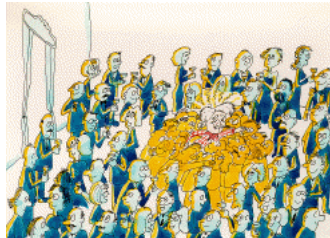
# Hvad er masse?

- Ifølge teorien - Standard-modellen - kan partikler ikke have masse. Men det har de altså!
- Løsningen er Higgs-mekanismen:



En fest med mange mennesker

Holger Bech Nielsen kommer og prøver at komme til baren i den anden ende

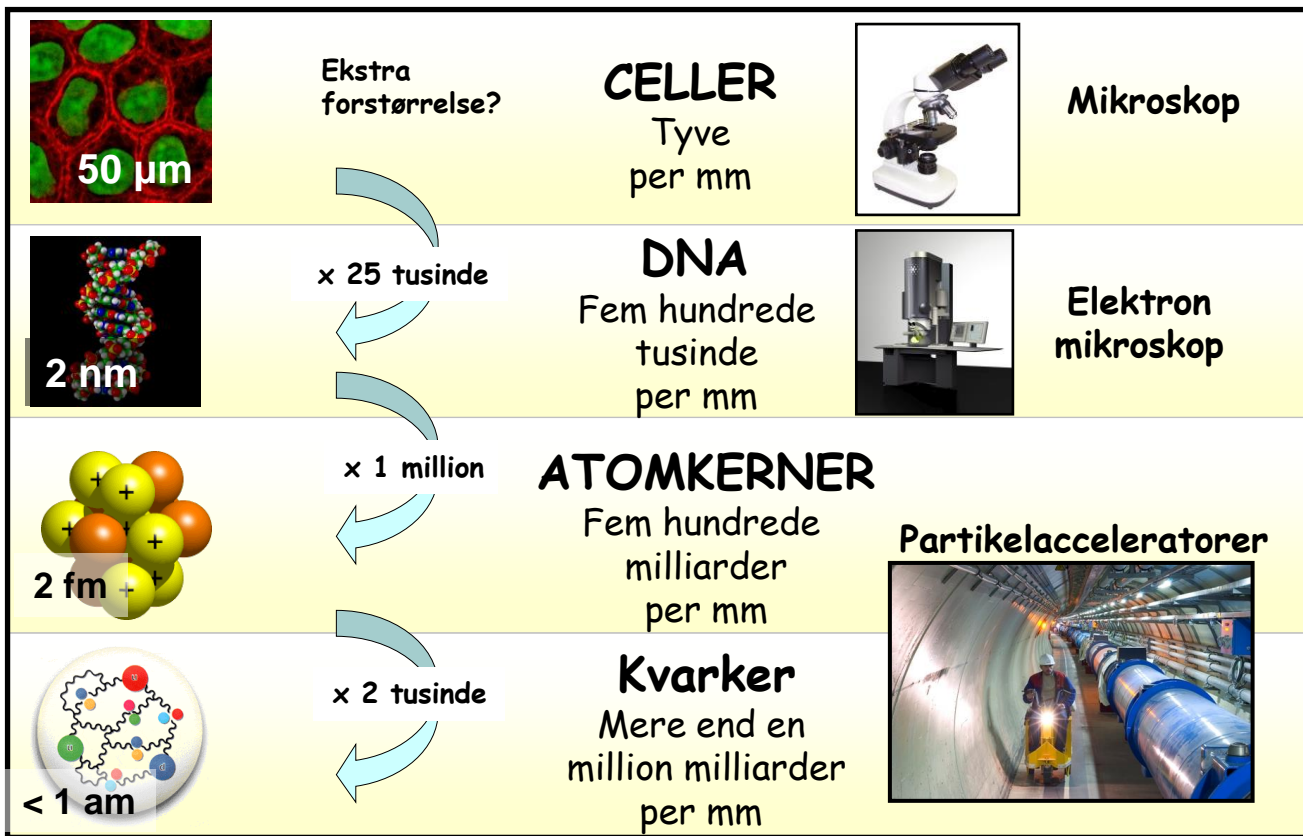


Folk stimler sammen om ham, og han får vanskeligere ved at komme frem; han har fået større masse p.g.a. vekselvirkning med omgivelserne



**På samme måde er hele universet fyldt med et energifelt: Higgs-feltet som giver partikler masse**

# Naturens mindste byggestene



Partikelfysik er (NANO)<sup>2</sup>=ATTO-fysik!



## Den Kosmiske forbindelse: Fra Kvarker til Kosmos

Alle de kendte (og ukendte) fundamentale partikler eksisterede i et kort øjeblik efter Big Bang.

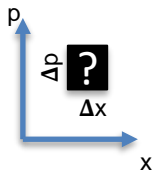
Studiet af partikelkollisioner er som at kigge tilbage i tiden og genskabe tilstanden i universet ved dets fødsel.

at et sekund efter dets fødsel

Ældre..... Større... Koldere... mindre energi

Moderne partikelfysik i en  
nøddeskal?

# Den magiske ligning



$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2} \quad (\hbar \approx 10^{-34} \text{ Js})$$

The uncertainty  
in position...

...times the uncertainty  
in momentum...

...cannot be zero: it must be  
at least this constant



Werner Heisenberg

## Heisenbergs usikkerhedsrelation

- **Jo mindre** en partikel er  
**Jo hurtigere** bevæger den sig.....
- Giver os kvantemekanik og strengteori

Endnu vigtigere:  
Hvad gør naturen der **hvor vi ikke kan se?**



**Den intuitive forståelse af partikelfysik**

# Tak til: Louis de Broglie

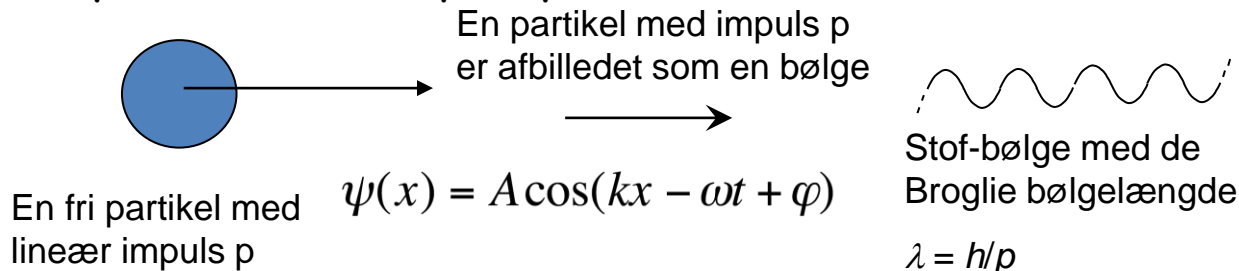


Prince de Broglie, 1892-1987

- Partikler har også bølgenatur
- Den totale energi  $E$  og impuls  $p$  af en partikel, er relateret til frekvensen  $\nu$  af den bølge forbundet med dets bevægelse via Plancks konstant

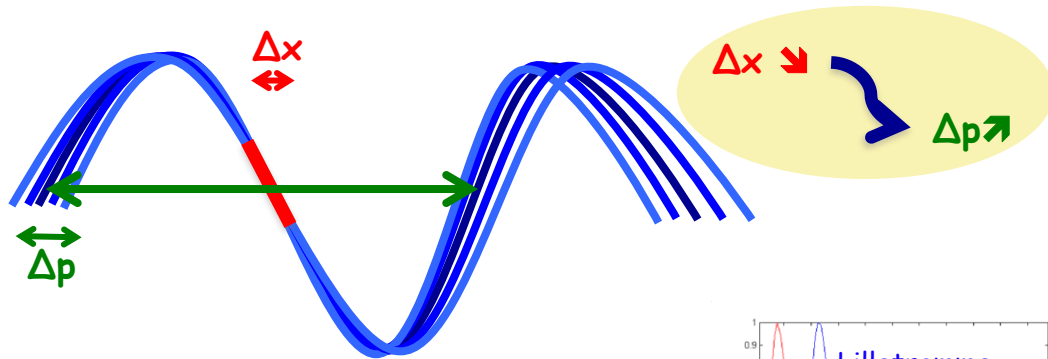
$$E = h\nu; \lambda = h/p$$

- Dette er de Broglie's formel som også forudsiger bølgelængden forbundet med bevægelsen af en partikel med impuls  $p$

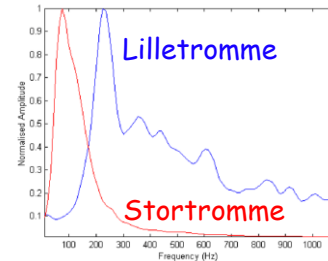


# Altså: Usikkerhedsrelation

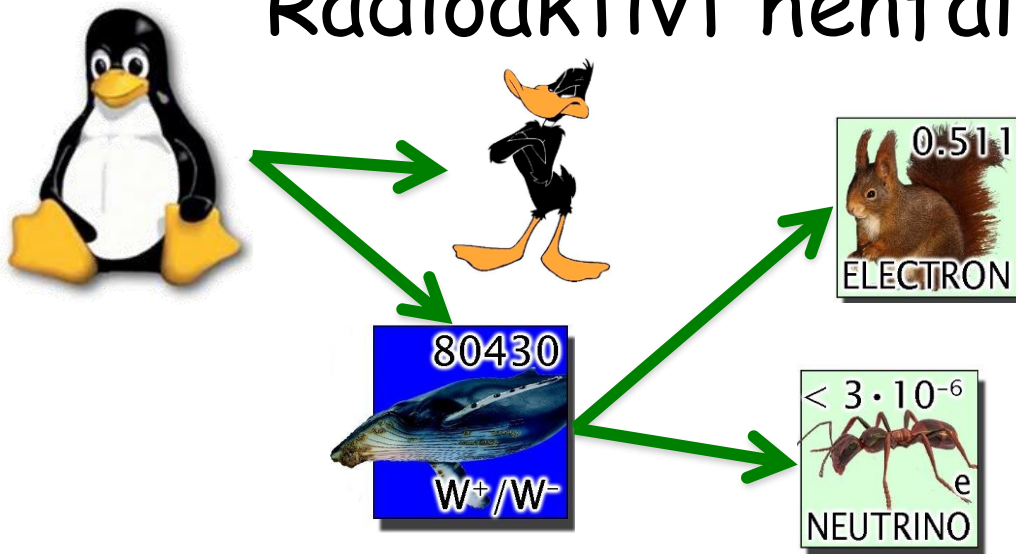
- En radikal ide:
  - En partikel er også en bølge
  - Impulsen,  $p$ , bestemmer bølge-længden / frekvens! ( $\lambda = \hbar / p$ )



- Kan ikke bruges til at forklare fejl i en fysik-rapport!



# Radioaktivt henfald



- Naturens dybeste hemlighed kan lade sig gøre hvis
$$\Delta t \times \Delta E \leq \hbar/2$$
- En partikel må gøre noget "ulovligt" (låne energi  $\Delta E$ ) bare den er på plads igen i løbet af kort tid ( $\Delta t$ )
- Vekselvirkninger er udveksling af virtuelle partikler
- **Virtuelle partikler er specielle:**  $E^2 \neq \vec{p}^2 c^2 + m_0^2 c^4$
- Eksempel: En virtuel foton har  $m^2 \neq 0$  !

# Partikelfysikerens Værktøjskasse

- Hurtige partikler beskrives med

Speciel relativitetsteori:

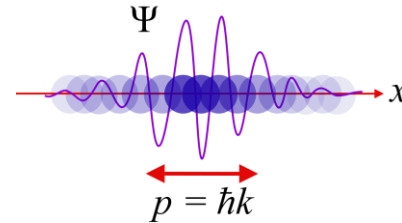
$$E = mc^2 = \gamma m_0 c^2$$
$$E^2 = \vec{p}^2 c^2 + m_0^2 c^4$$

Invariant  
masse  
(hvilemasse)

- Små partikler beskrives med

Kvantemekanik:

$$i \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{1}{2m} \nabla^2 \psi$$



Anvendt speciel relativitetsteori og kvantemekanik!

- Plus en **stor pose med nye partikler** og begreber
- Resultatet er: **Kvante-felt-teori**

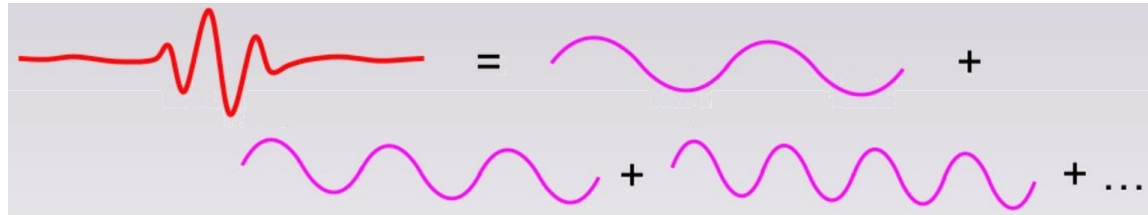
# Kvante-felt-teori (QFT)

- QFT er **ikke en erstatning for kvantemekanik** - det er en formulering af kvantemekanik
- Alle konfigurationer beskrives af værdier af relativistiske felter,  **$\phi(x)$** .
- En kvantetilstand beskrives stadig ved en bølgefunktion,  **$\Psi[\phi(x)]$** .
- Eksempler: **Elektromagnetisk felt**, **elektron felt**, **top-kvark felt**, ....



# Partikler fra felter

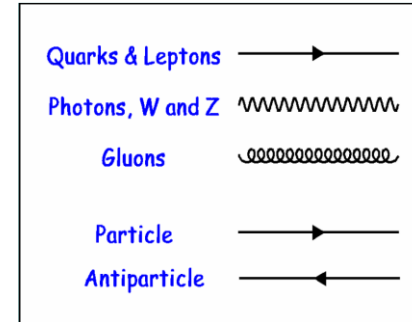
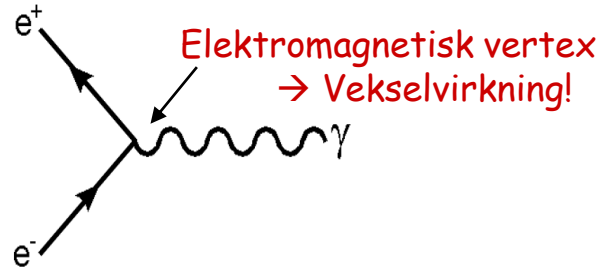
- Opløs et oscillerende felt som en sum af forskellige "modes" - bølgelængder (Fourier transformation):



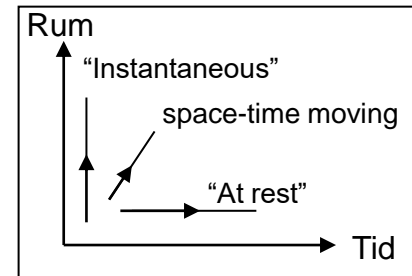
- Hver mode er en simpel bølge (fast frekvens)
- Energien er bestemt af bølgelængde og antal partikler
- Kvante-felt-teori beskriver en partikel som en sum af elementære svingninger.

# Feynman diagrammer

- R. Feynman udviklede en diagram teknik til at repræsentere processer i partikelfysik (1940+).

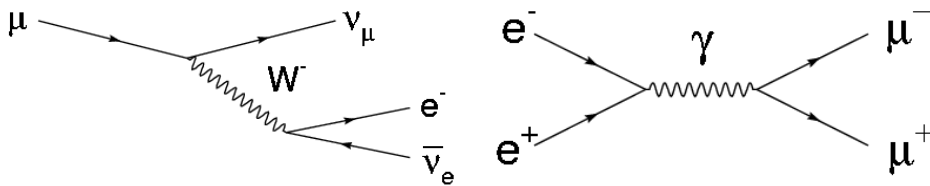


- Regler og betingelser
  - Tid løber fra venstre mod højre
  - En pil pegende mod **højre** indikerer en **partikel** - mod **venstre** en **antipartikel**
  - Hver gruppe af partikler har en separate stil
  - For hvert vertex gælder:
    - **Bevaret:** farveladning (kvarker/gluoner), elektrisk ladning, impuls, og angulær impuls
    - **Brudt:** energi ( )

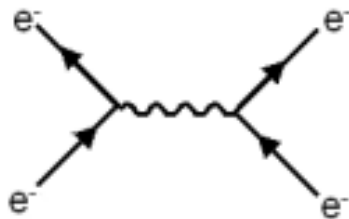


# Feynman Diagrammer

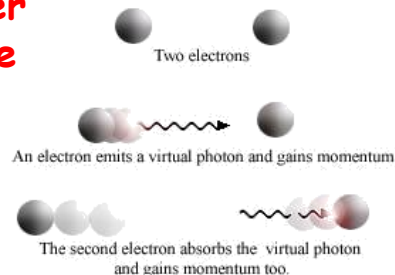
- Feynman diagrammer er en billedlig repræsentation af
  - Sandsynligheder for partikelreaktioner
  - Et **feynman diagram angiver "Amplitude-kvadrat" / sandsynlighed** (kvantemekanik)
- Feynman diagrammer og tilhørende regler gør beregninger nemme
- Eksempler:  $\mu^- \rightarrow e^- \nu_e \nu_\mu$  or  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$  sammenstød.



Hver linje og knude har en streng matematisk betydning for den endelige beregning. Regler og regneteknik er for komplicerede til dette kursus!



Feynman og hans diagrammer



# (Og så endelig FORMLEN! 😊)

$$L = \sum_f i\bar{\psi}_f \gamma_\mu D^\mu \psi_f - \frac{1}{4} \sum_k F_W^{k\mu\nu} F_{W\mu\nu}^k - \frac{1}{4} F_B^{\mu\nu} F_{B\mu\nu} - \frac{1}{2} \text{tr}(G_{\mu\nu} G^{\mu\nu})$$

$$+(D_\mu \phi)^\dagger (D^\mu \phi) - (\mu^2 \phi^\dagger \phi + \lambda(\phi^\dagger \phi)^2)$$

$$+\sum_f g_f \bar{\psi}_f \phi \psi_f$$

} HIGGS!!

+ Hidden ingredients

- $L$  kaldes "Lagrangian" - kommer fra analytisk mekanik

$$L = (E_{\text{kin}} - E_{\text{pot}}) / m^3 \text{ (energitæthed)}$$

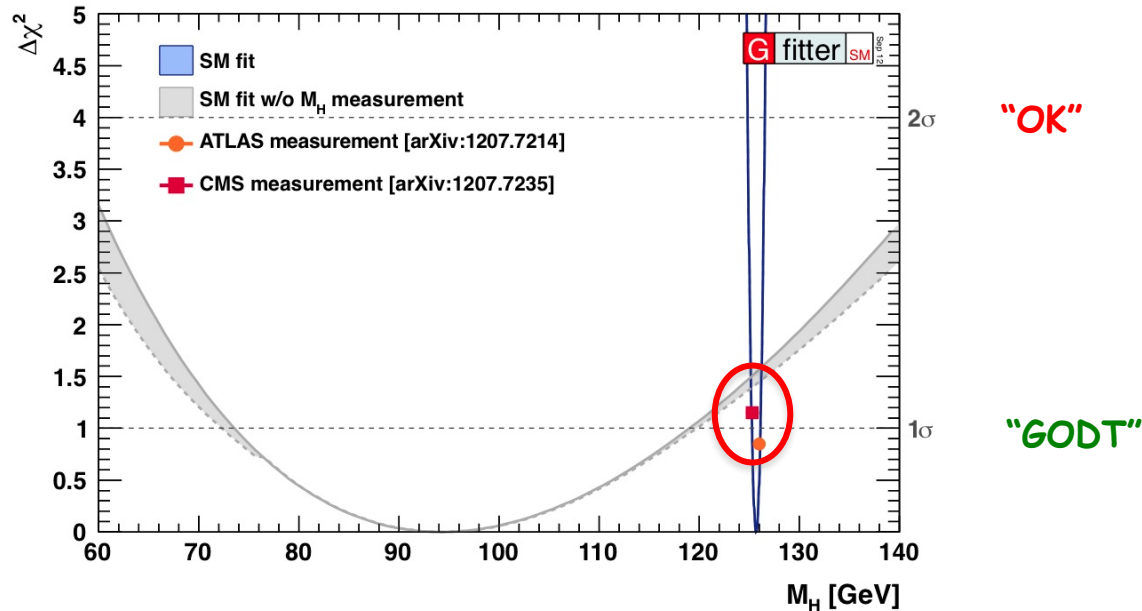
- Fra dette udtryk kan nær sagt alt vi ved udledes!
- Husk, det er denne ligning der giver os avanceret elektronik, håb om ren fusion, osv. Osv.)

**Det er faktisk alt...**

# Jagten på Higgs partiklen var en success!

## Passer det med Standard Modellen?

Status per 14. marts 2013



Higgs partiklens masse passer rimeligt GODT med en Standard Model Higgs-partikel's favorit-værdi!

## Hvad har vi lært af Higgspartiklens opdagelse?

Før opdagelsen af Higgspartiklen håbede vi at massen af Higgspartiklen selv ville afsløre den sande natur **af standardmodellens afløser**

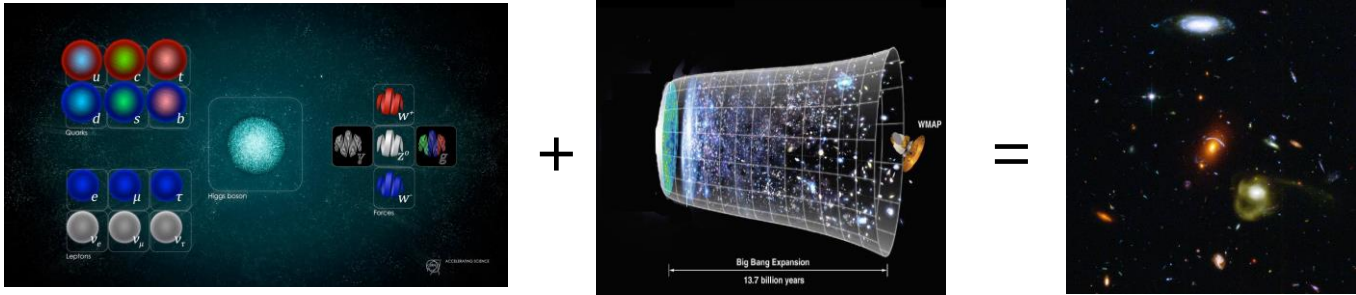
Det var yderst velbegrundede håb....

*MEN, værdien af den målte masse minder mest af alt om et klassisk svar fra oldtidens orakler:*



Vi fandt **PRÆCIST** det vi forventede fra standardmodellen - **Men hvorfor netop den Higgsmasse?**

# Er vi færdige? Higgs'en er jo fundet?

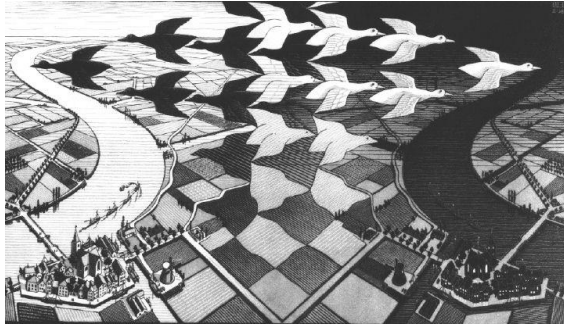


Nej! Mange fundamentale spørgsmål  
er ubesvaret...

**Faktisk burde Universet eller vi ikke  
eksistere!**

Problemer,  
Problemer,  
**Problemer!**

# Hvor er alt anti-stoffet?



Stof og anti-stof  
burde være blevet skabt  
i lige store mængder



Universet gemmer over en subtil  
forskell mellem stof og anti-stof...  
Hvad er årsagen til denne forskel?

Det er derfor vi **OVERHOVEDET** er her!  
Vi er skabt af det stof som blev til overs ved universets fødsel



# Hvad er mørkt eller "Usynligt" stof?

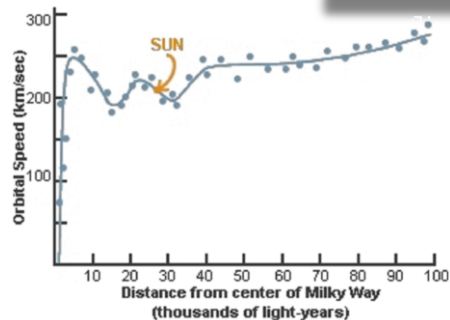
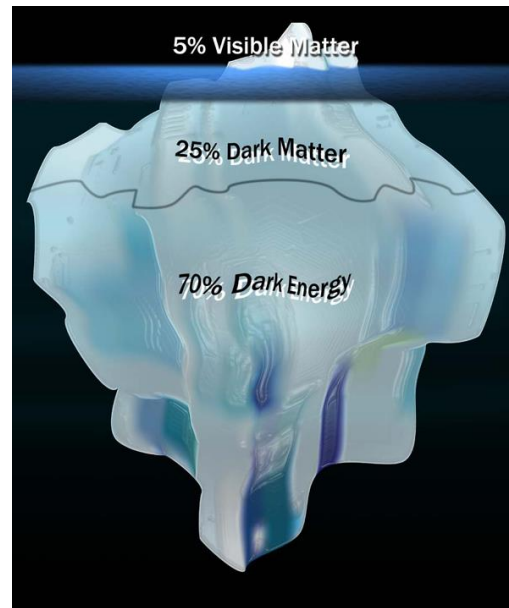
**Normalt:** Består af atomer  
Inkluderer stjerner,  
planeter, mennesker...

**Mørkt Stof:** Ukendt natur  
(ikke atomer)  
kunne være en "tung fætter"  
til fotonen:

**super-tungt LYS**

Se det ved at prøve at skabe det

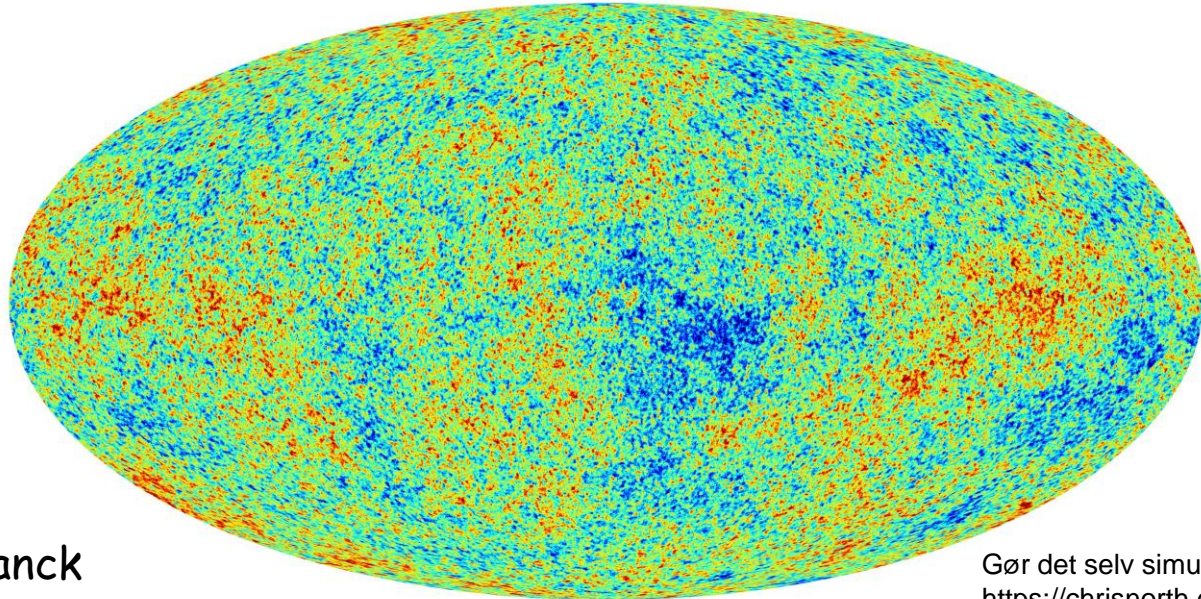
**Mørkt energi:** Endnu mere mærkeligt!  
Det accelererer universets  
udvidelse...



# Hvad er mørk energi?

Den kosmiske mikrobølge baggrundsstråling er ekstremt isotropisk med en temperatur på  $T_{\text{CMB}} = 2,725 \text{ K}$ .

Mørk energi frastøder stof og dermed **accelererer** det universets udvidelse...



Planck

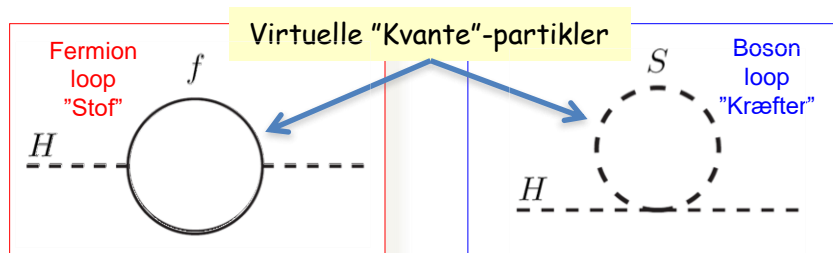


Gør det selv simulator:  
<https://chrisnorth.github.io/planckapps/Simulator/>



# Er det "nok" at finde Higgs'en?

- NEJ! → Kvanteeffekter er katastrofale for Higgs-partiklen!



**Alle partikelmasser skal passe sammen!**

- Resultat i Standardmodellen

$$m_H + \delta m_H \approx ??? + 1000000000000000000000 (10^{19}) \text{ GeV!}$$

## **"Catch 22"**

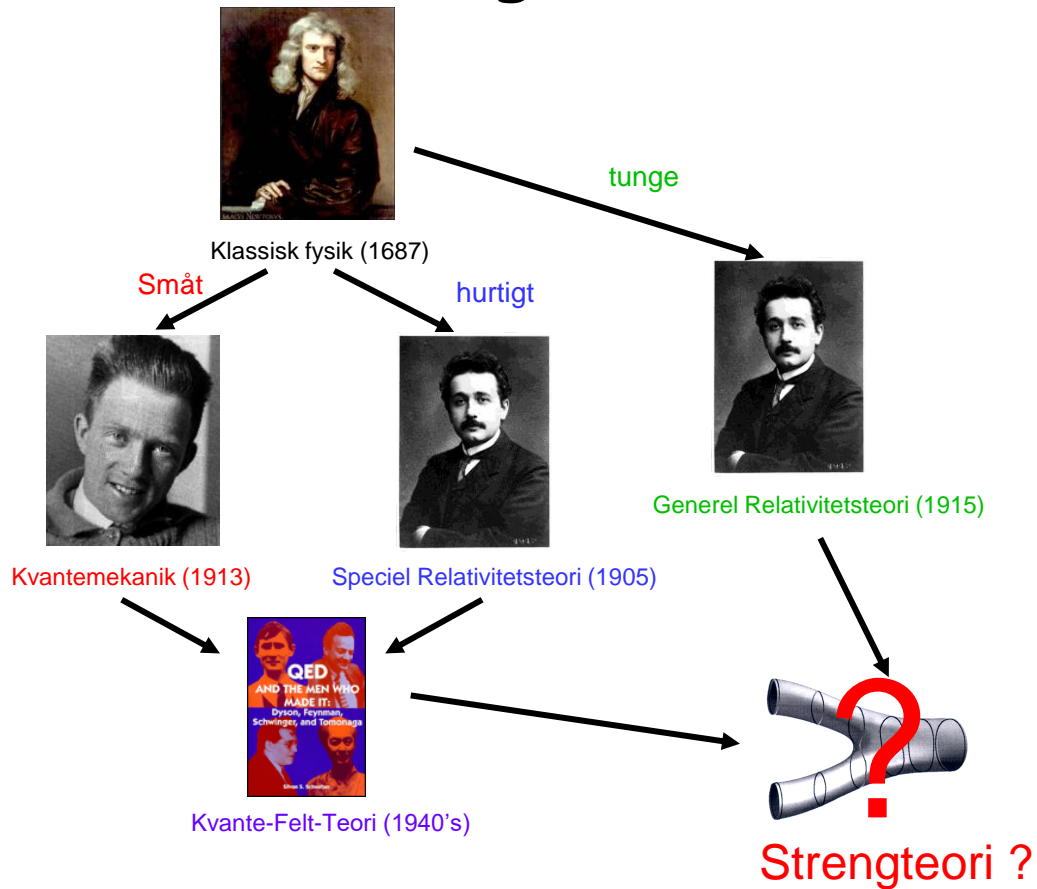
Higgs-partiklen **skal være let** for at Standard modellen virker  
Men beregner vi Higgs-partiklens masse i Standard modellen bliver den (næsten) **uendelig tung**...

Stephen Hawking: **"We have not yet observed an elementary spin-0 (Higgs)**

**particle, and I predict we never will."**

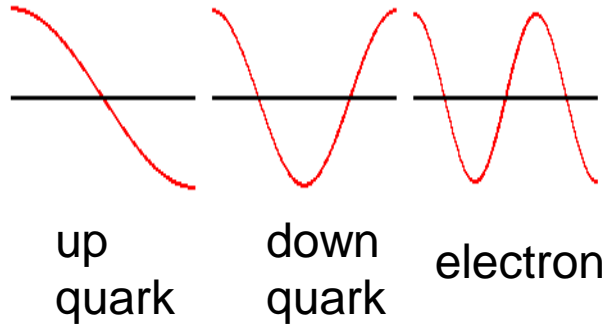


# Løsningen?

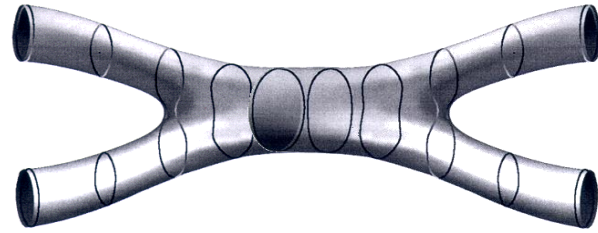


# I Strengteori er Partikler Strenge

Forskellige Vibrationer →  
Forskellige Partikler



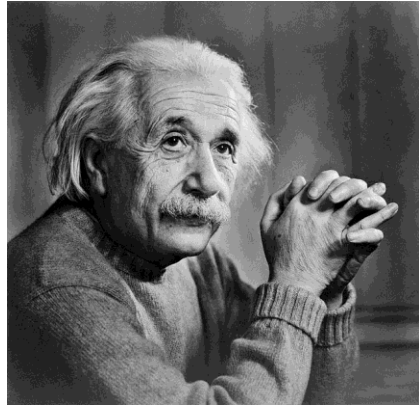
Streng sammensmeltning →  
Partikel reaktioner



Strengteori realiserer Einstein's drøm om en forenet teori

Ultimativt håber vi på at finde en teori,  
som forklarer alt uden input parametre.

# En teori om Alting: Strengteori



Einstein

"...there are no arbitrary constants ... nature is so constituted that it is possible logically to lay down such strongly determined laws that within these laws only rationally determined constants occur (not constants, therefore, whose numerical value could be changed without destroying the theory)."





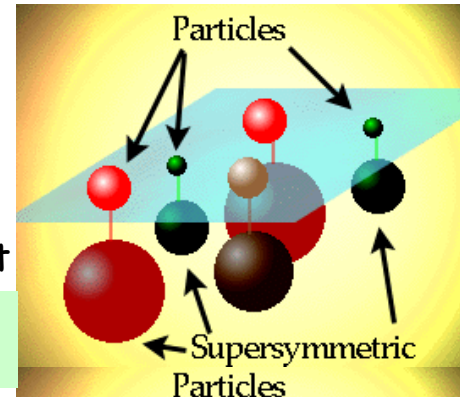
# Problem-løsning 101

Supersymmetri  
→ Gem problemet

# Hvad er Supersymmetri?

Der er 2 klasser af partikler i naturen: Fermioner og bosoner.

- Fermioner er "spin-1/2" partikler - hvilket betyder at de SKAL følge **Pauli's udelukkelsesprincip** - **holder sig fra hinanden** - bor ALTID på eneværelser
- Bosoner er "spin-0" eller "spin-1" - og **elsker hinandens selskab** - bor i store fælles rum på vandrehjem
- **Supersymmetri** siger at for enhver fermion i naturen er der en boson og omvendt
- Men symmetrien er ikke perfekt:
  - Supersymmetriske partikler er ikke set
  - De må være tunge



**Spartikler!**

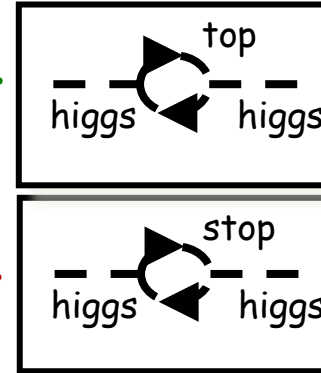
# Hvorfor Supersymmetri?

- **Higgs-partiklens masse**

- spartikler giver næsten samme bidrag
- **Modsat fortegn!**

Higgs-partiklens masse bliver nu automatisk lille

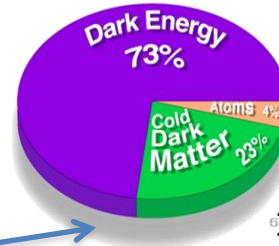
Facit:  $\delta m_H \approx 0$



- Men spartiklerne skal veje mindre end ca. 1000 GeV

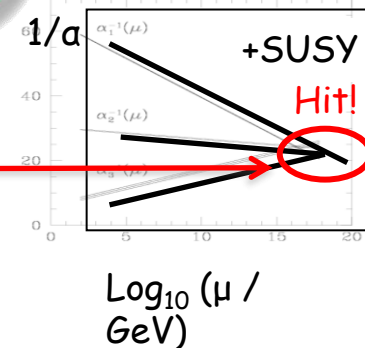
- LHC er perfekt til at opdage en masse SUSY partikler

- Spartikler kunne være mørkt stof



- Supersymmetri forbedrer kræfternes forening!

- Superstrengteori - Teorien Om Alting - kræver supersymmetri



# Problem-løsning 101

Ekstra dimensioner

→ Fjern problemet

# Ekstra Dimensioner

- $(x, y, z, t) + w, v, \dots?$  Science fiction?
- Nej - et varmt - og det bliver varmere - emne i forskningen i dag:
  - Hvad er verden lavet af?
  - Hvordan virker tyngdekraften?
- Hvordan skete den udvikling?

# En femte dimension?



Theodor Kaluza  
1885-1954

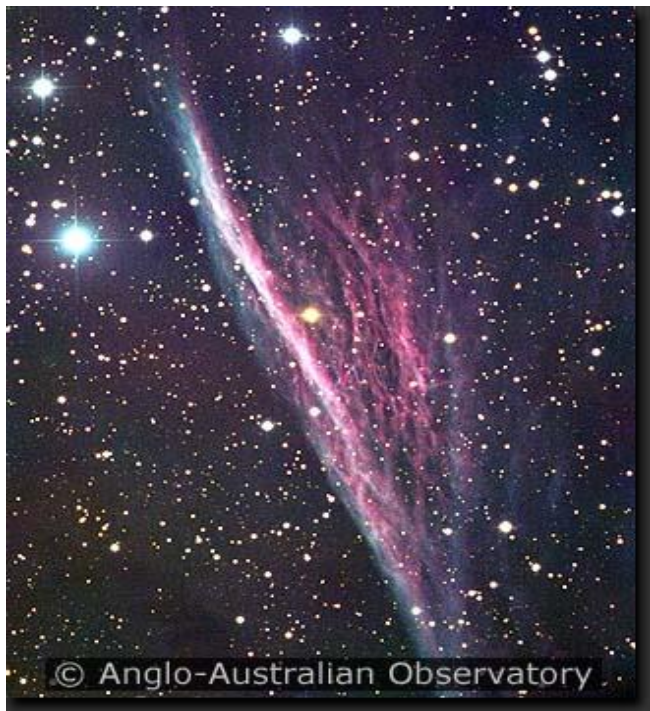
- Den polske matematiker Kaluza viste i 1919 at tyngdekraften og elektromagnetismen kunne forenes i en enkelt teori med 5 dimensioner - "à la Einstein"

"The idea of achieving a unified theory by means of five-dimensional world would never have dawned on me...At first glance I like your idea tremendously"

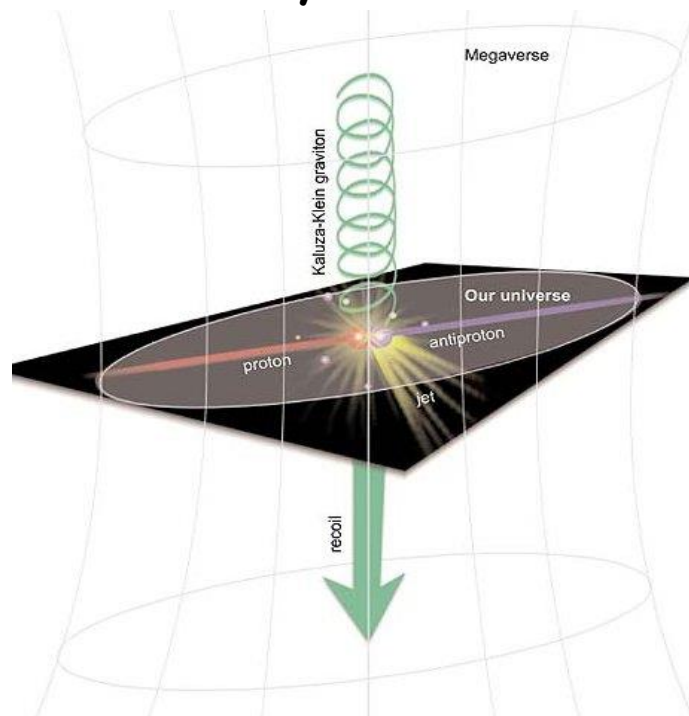


# Ekstra dimensioner - hovedideen

Det traditionelle billede



Det nye billede



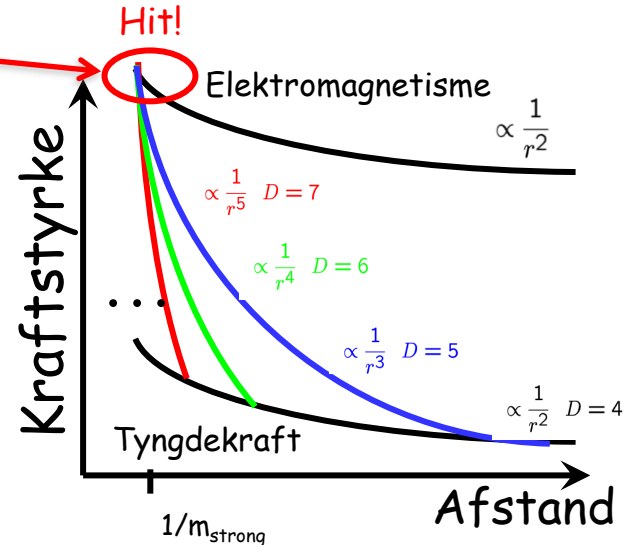
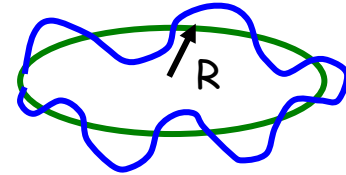


# Problemet med tyngdekraften - Svag?

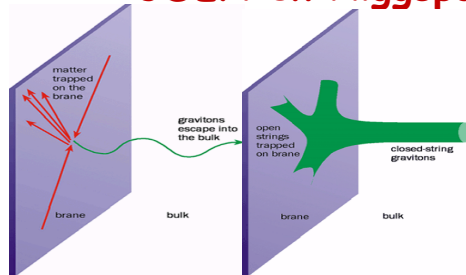
- Løsningen på problemet med Higgspartiklens masse:  
Tyngdekraften er ikke svag  $\rightarrow$  bevæger sig i **ekstra dimensioner**

Facit:  $\delta m_H \approx 0$

- Modeller med Ekstra dimensioner har også ekstra partikler  
**KK-partikler** kunne være **mørkt stof**
- Ekstra dimensioner **forbedrer** kræfternes forening!
- Der findes modeller med ekstra dimensioner

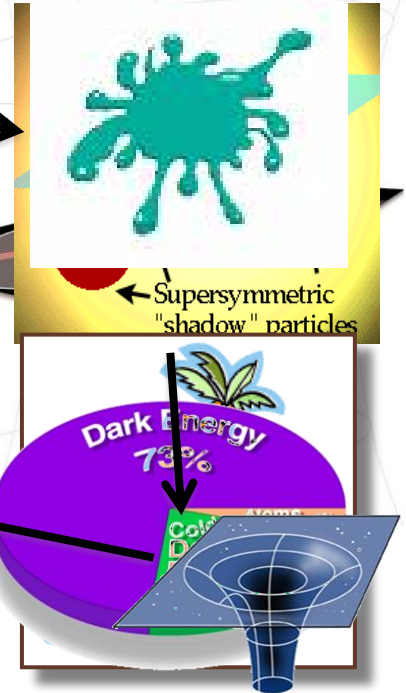


## UDEN en Higgspartikel



# Hvad håber vi at se?

1. **Fundet!!?** → **Higgspartiklen**
  - Hvis Higgs: Studere den
  - **Hvis ikke Higgs:** Find noget mere
2. Kig efter tegn på "ny fysik"
  - Super Symmetri (SUSY)
  - Nye elementarpartikler
  - Ekstra dimensioner
    - Mikroskopiske Sorte Huller
  - Hvorfor er der ikke noget anti-stof?
  - Universets mangler stof: SORT STOF
3. Vi forventer Higgs og/eller noget "nyt" ved LHC



LHC detektorerne kan finde alle disse spændende ting  
hvis de dukker op  
Men kan også finde noget helt NYT!

# Er verden supersymmetrisk? ATLAS scoretavle

ATLAS SUSY Searches\* - 95% CL Lower Limits

July 2024

ATLAS Preliminary

$\sqrt{s} = 13$  TeV

Model	Signature	$\int \mathcal{L} dt$ [ $\text{fb}^{-1}$ ]	Mass limit	Reference		
Inclusive Searches	$\tilde{q}\tilde{q}, \tilde{q} \rightarrow q\tilde{t}_1^0$	0 $e, \mu$	2-6 jets $E_T^{\text{miss}}$ 140	$\tilde{q}$ [1x, 8x Degrad.] 1.0, 1.85	$m(\tilde{t}_1^0) < 400$ GeV	
	mono-jet	1-3 jets $E_T^{\text{miss}}$ 140	$\tilde{q}$ [8x Degrad.] 0.9	$m(\tilde{q}) - m(\tilde{t}_1^0) = 5$ GeV	2102.10874	
	$\tilde{\chi}\tilde{\chi}, \tilde{\chi} \rightarrow \tilde{q}\tilde{q}\tilde{t}_1^0$	0 $e, \mu$	2-6 jets $E_T^{\text{miss}}$ 140	$\tilde{\chi}$ Forbiddet	$m(\tilde{t}_1^0) = 0$ GeV	
					$m(\tilde{t}_1^0) = 1000$ GeV	2010.14293
					$m(\tilde{t}_1^0) = 600$ GeV	2101.01629
	$\tilde{\chi}\tilde{\chi}, \tilde{\chi} \rightarrow \tilde{q}\tilde{q}W\tilde{t}_1^0$	1 $e, \mu$	2-6 jets $E_T^{\text{miss}}$ 140	$\tilde{\chi}$ 2.2	$m(\tilde{t}_1^0) < 700$ GeV	2204.13072
	$\tilde{\chi}\tilde{\chi}, \tilde{\chi} \rightarrow \tilde{q}\tilde{q}(\ell\tilde{t}_1^0)$	$e, \mu, \mu$	2 jets $E_T^{\text{miss}}$ 140	$\tilde{\chi}$ 2.2	$m(\tilde{t}_1^0) < 600$ GeV	2008.06032
	$\tilde{\chi}\tilde{\chi}, \tilde{\chi} \rightarrow \tilde{q}\tilde{q}WZ\tilde{t}_1^0$	0 $e, \mu$	7-11 jets $E_T^{\text{miss}}$ 140	$\tilde{\chi}$ 1.97	$m(\tilde{t}_1^0) < 200$ GeV	2307.01094
	$\tilde{\chi}\tilde{\chi}, \tilde{\chi} \rightarrow \tilde{q}\tilde{q}WZ\tilde{t}_1^0$	SS $e, \mu$	6 jets $E_T^{\text{miss}}$ 140	$\tilde{\chi}$ 15	$m(\tilde{t}_1^0) < 500$ GeV	2211.08028
	$\tilde{\chi}\tilde{\chi}, \tilde{\chi} \rightarrow \tilde{t}_1^0\tilde{t}_1^0$	0-1 $e, \mu$	3 b $E_T^{\text{miss}}$ 140	$\tilde{\chi}$ 1.25, 2.45	$m(\tilde{t}_1^0) - m(\tilde{t}_1^0) = 300$ GeV	1909.08457
3 <sup>rd</sup> gen. squarks direct production	$\tilde{b}_1\tilde{b}_1$	0 $e, \mu$	2 b $E_T^{\text{miss}}$ 140	$\tilde{b}_1$ 1.255	$m(\tilde{t}_1^0) < 400$ GeV	
	$\tilde{b}_1\tilde{b}_1, \tilde{b}_1 \rightarrow \tilde{b}\tilde{t}_2^0 \rightarrow \tilde{b}\tilde{t}_1^0$	0 $e, \mu$	6 b $E_T^{\text{miss}}$ 140	$\tilde{b}_1$ 0.68	10 GeV $< \Delta m(\tilde{b}_1, \tilde{t}_1^0) < 20$ GeV	
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow \tilde{t}\tilde{t}_1^0$	2 $\tau$	2 b $E_T^{\text{miss}}$ 140	$\tilde{t}_1$ Forbiddet	$\Delta m(\tilde{t}_1^0, \tilde{t}_1^0) = 130$ GeV, $m(\tilde{t}_1^0) < 100$ GeV	
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow \tilde{t}\tilde{t}_1^0$	0-1 $e, \mu$	$\geq 1$ jet $E_T^{\text{miss}}$ 140	$\tilde{t}_1$ 1.25	$\Delta m(\tilde{t}_1^0, \tilde{t}_1^0) = 130$ GeV, $m(\tilde{t}_1^0) < 100$ GeV	
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow W\tilde{b}\tilde{t}_1^0$	1 $e, \mu$	3 jets/1 b $E_T^{\text{miss}}$ 140	$\tilde{t}_1$ Forbiddet	$m(\tilde{t}_1^0) = 0$ GeV	
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow \tilde{t}_1\tilde{b}\nu, \tilde{t}_1 \rightarrow \tilde{t}\tilde{G}$	1-2 $\tau$	2 jets/1 b $E_T^{\text{miss}}$ 140	$\tilde{t}_1$ Forbiddet	$m(\tilde{t}_1^0) = 0$ GeV	
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow \tilde{t}\tilde{t}_1^0 / \tilde{t}\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow \tilde{t}\tilde{t}_1^0$	0 $e, \mu$	2 $e$ $E_T^{\text{miss}}$ 140	$\tilde{t}_1$ 1.4	$m(\tilde{t}_1^0) = 0$ GeV	
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow \tilde{t}\tilde{t}_1^0, \tilde{t}_1^0 \rightarrow Z/\tilde{h}\tilde{t}_1^0$	0 $e, \mu$	mono-jet $E_T^{\text{miss}}$ 140	$\tilde{t}_1$ 0.55, 0.85	$m(\tilde{t}_1^0) = 0$ GeV	
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow \tilde{t}\tilde{t}_1^0, \tilde{t}_1^0 \rightarrow Z/\tilde{h}\tilde{t}_1^0$	1-2 $e, \mu$	1-4 b $E_T^{\text{miss}}$ 140	$\tilde{t}_1$ 0.067, 0.18	$m(\tilde{t}_1^0) = 500$ GeV	
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow \tilde{t}\tilde{t}_1^0, \tilde{t}_1^0 \rightarrow Z/\tilde{h}\tilde{t}_1^0$	3 $e, \mu$	1 b $E_T^{\text{miss}}$ 140	$\tilde{t}_1$ Forbiddet	$m(\tilde{t}_1^0) = 360$ GeV, $m(\tilde{t}_1^0) - m(\tilde{t}_1^0) = 40$ GeV	
EW direct	$\tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_1^0$ via WZ	Multiple $\ell$ jets $e, \mu, \mu$	$\geq 1$ jet $E_T^{\text{miss}}$ 140	$\tilde{\chi}_1^0$ 0.205, 0.96	$m(\tilde{t}_1^0) = 0$ , wino-bino	
	$\tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_1^0$ via WW	2 $e, \mu$	0 jets $E_T^{\text{miss}}$ 140	$\tilde{\chi}_1^0$ 0.42	$m(\tilde{t}_1^0) = 0$ , wino-bino	
	$\tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_1^0$ via Wh	Multiple $\ell$ jets $e, \mu, \mu$	$\geq 1$ jet $E_T^{\text{miss}}$ 140	$\tilde{\chi}_1^0$ Forbiddet	$m(\tilde{t}_1^0) = 70$ GeV, wino-bino	
	$\tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_1^0$ via $\tilde{L}_i/\tilde{\nu}$	2 $e, \mu$	0 jets $E_T^{\text{miss}}$ 140	$\tilde{\chi}_1^0$ 1.0	$m(\tilde{t}_1^0) = 0, 50$ GeV, $m(\tilde{t}_1^0) = 0$	
	$\tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_1^0$ via $\tilde{L}_i/\tilde{\nu}$	2 $\tau$	0 jets $E_T^{\text{miss}}$ 140	$\tilde{\chi}_1^0$ 0.35, 0.5	$m(\tilde{t}_1^0) = 0$	
	$\tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_1^0$ via $\tilde{L}_i/\tilde{\nu}$	2 $e, \mu$	0 jets $E_T^{\text{miss}}$ 140	$\tilde{\chi}_1^0$ 0.7	$m(\tilde{t}_1^0) = 0$	
	$\tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_1^0$ via $\tilde{L}_i/\tilde{\nu}$	$e, \mu, \mu$	$\geq 1$ jet $E_T^{\text{miss}}$ 140	$\tilde{\chi}_1^0$ 0.26	$m(\tilde{t}_1^0) = 10$ GeV	
	$\tilde{H}\tilde{H}, \tilde{H} \rightarrow \tilde{h}\tilde{G}/Z\tilde{G}$	0 $e, \mu$	$\geq 3$ b $E_T^{\text{miss}}$ 140	$\tilde{H}$ 0.55, 0.94	$\text{BR}(\tilde{H}^0 \rightarrow h\tilde{G}) = 1$	
	$\tilde{H}\tilde{H}, \tilde{H} \rightarrow \tilde{h}\tilde{G}/Z\tilde{G}$	4 $e, \mu$	0 jets $E_T^{\text{miss}}$ 140	$\tilde{H}$ 0.45-0.93	$\text{BR}(\tilde{H}^0 \rightarrow Z\tilde{G}) = 1$	
	$\tilde{H}\tilde{H}, \tilde{H} \rightarrow \tilde{h}\tilde{G}/Z\tilde{G}$	0 $e, \mu$	$\geq 2$ large jets $E_T^{\text{miss}}$ 140	$\tilde{H}$ 0.77	$\text{BR}(\tilde{H}^0 \rightarrow Z\tilde{G}) = \text{BR}(\tilde{H}^0 \rightarrow h\tilde{G}) = 0.5$	
Long-lived particles	Direct $\tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_1^0$ prod., long-lived $\tilde{\chi}_1^0$	Disapp. trk	1 jet $E_T^{\text{miss}}$ 140	$\tilde{\chi}_1^0$ 0.21, 0.66	Pure Wino	
	Stable $\tilde{\chi}_1^0$ R-hadron	pixel dE/dx	$E_T^{\text{miss}}$ 140	$\tilde{\chi}_1^0$ 2.05	Pure Higgsino	
	Metastable $\tilde{\chi}_1^0$ R-hadron, $\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \tilde{q}\tilde{q}\tilde{t}_1^0$	pixel dE/dx	$E_T^{\text{miss}}$ 140	$\tilde{\chi}_1^0$ 2.2	$m(\tilde{t}_1^0) = 100$ GeV	
	$\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow \tilde{G}$	Displ. lep	$E_T^{\text{miss}}$ 140	$\tilde{t}_1$ 0.36, 0.74	$\tau(\tilde{t}_1) = 0.1$ ns	
	$\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow \tilde{G}$	pixel dE/dx	$E_T^{\text{miss}}$ 140	$\tilde{t}_1$ 0.36	$\tau(\tilde{t}_1) = 0.1$ ns	
RPV	$\tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow Z\ell\ell$	3 $e, \mu$	0 jets $E_T^{\text{miss}}$ 140	$\tilde{\chi}_1^0$ [BR(Z $\tau$ )=1, BR(Z $e$ )=1] 0.625, 1.0	Pure Wino	
	$\tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow WZ\ell\ell\nu\nu$	4 $e, \mu$	0 jets $E_T^{\text{miss}}$ 140	$\tilde{\chi}_1^0$ [A $_{00} \neq 0, A_{11} \neq 0$ ] 0.95, 1.55	$m(\tilde{t}_1^0) = 200$ GeV	
	$\tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \tilde{q}\tilde{q}\tilde{t}_1^0$	Multiple	36.1	$\tilde{\chi}_1^0$ [m( $\tilde{t}_1^0$ )=50 GeV, 1250 GeV] 1.6, 2.34	Large $\tilde{t}_1^0$	
	$\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow \tilde{t}\tilde{t}_1^0, \tilde{t}_1^0 \rightarrow b\tilde{s}$	Multiple	36.1	$\tilde{t}_1$ [A $_{00} \neq 0, A_{11} \neq 0$ ] 0.55, 1.0	$m(\tilde{t}_1^0) = 200$ GeV, bino-like	
	$\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow \tilde{t}\tilde{t}_1^0, \tilde{t}_1^0 \rightarrow b\tilde{s}$	$\geq 4$ b	140	$\tilde{t}_1$ Forbiddet	$m(\tilde{t}_1^0) = 500$ GeV	
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow b\tilde{s}$	2 jets + 2 b	36.7	$\tilde{t}_1$ [gg, M] 0.42, 0.61	1710.07171	
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow q\tilde{\ell}$	2 $e, \mu$	2 b DV 136	$\tilde{t}_1$ [1e-10 < A $_{00}$ < 1e-8, 3e-10 < A $_{11}$ < 3e-9] 1.0	$\text{BR}(\tilde{t}_1 \rightarrow bc/\tilde{t}\nu) > 20\%$	
$\tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \tilde{t}\tilde{t}_1^0, \tilde{t}_1^0 \rightarrow b\tilde{s}$	1-2 $e, \mu$	$\geq 6$ jets 140	$\tilde{\chi}_1^0$ 0.2-0.32	$\text{BR}(\tilde{t}_1 \rightarrow \tilde{q}\tilde{g}) = 100\%$ , $\cos\beta = 1$		

Ser ikke ud til det..

\*Only a selection of the available mass limits on new states or phenomena is shown. Many of the limits are based on simplified models, c.f. refs. for the assumptions made.

10<sup>-1</sup> 1 Mass scale [TeV]

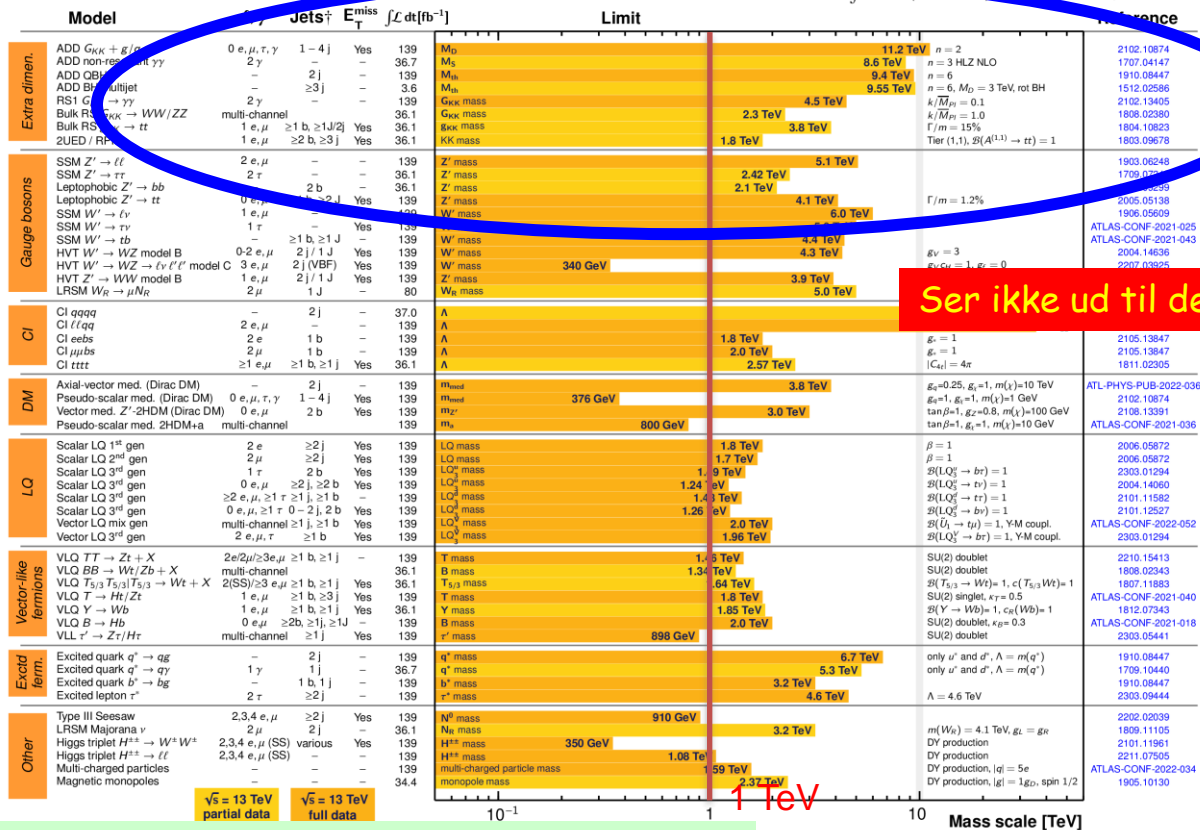
# Har vi glemt en ekstra dimension?

ATLAS Heavy Particle Searches\* - 95% CL Upper Exclusion Limits

Status: March 2023

ATLAS Preliminary

$\sqrt{s} = 13$  TeV

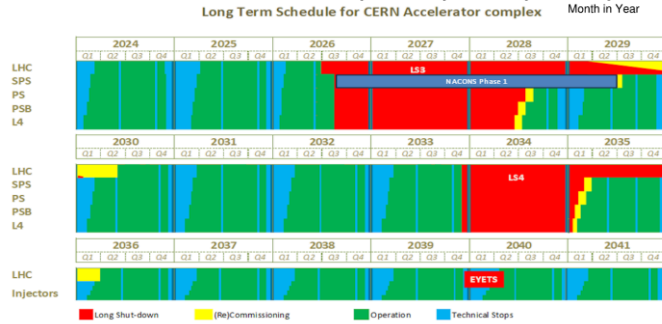
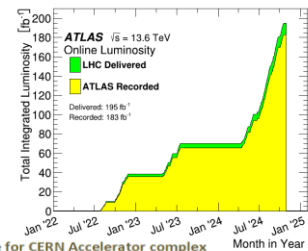


Ser ikke ud til det..

Ingen opdagelser - ENDNU!

# SÅ jagten på det ukendte er ikke slut!!!!

- LHC "sæson 3" er i gang
  - Startede 5. juli 2022
  - Planlagt slutning Juni 2026



Google: "LHC page one"

Vistar

LHC Page1 Fill: 8315 E: 6800 GeV t(SB): 10:54:09 27-10-22 07:25:03

**PROTON PHYSICS: STABLE BEAMS**

Energy: 6800 GeV | B1: 2.20e+14 | B2: 2.30e+14

Beta\* IP1: 0.30 m Beta\* IP2: 10.00 m Beta\* IP5: 0.30 m Beta\* IP8: 2.00 m

Inst. Lumi [(ub.s)<sup>-1</sup>] IP1: 12178.01 IP2: 8.51 IP5: 12529.67 IP8: 337.10

LHC Intensity and Beam Energy  
 Intensity vs Energy (GeV) graph showing a peak at 6800 GeV.

Inst and above Luminosity  
 Luminosity / (A/B cm<sup>-2</sup>) graph showing a peak at 2.20e+14.

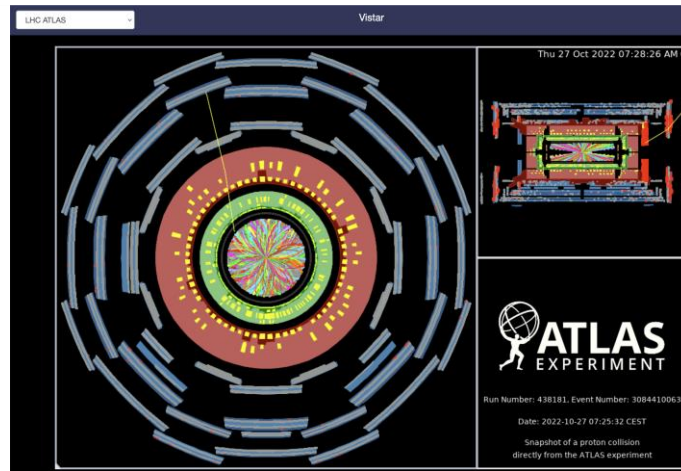
Comments (26-Oct-2022 20:53:04)  
 \*\*\* STABLE BEAMS \*\*\*  
 IP1/5 B\* levelling mu = 54 (+/- 2.5%)  
 IP2/8 : separation levelling  
 XRP IN

BIS status and SMP flags

	B1	B2
Link Status of Beam Permits	true	true
Global Beam Permit	true	true
Setup Beam	false	false
Beam Presence	true	true
Moveable Devices Allowed In	true	true
Stable Beams	true	true

AFS: 25ns\_2462b\_2450\_1737\_1735\_180bpl\_17inj\_2INDIV PM Status B1 **ENABLED** PM Status B2 **ENABLED**

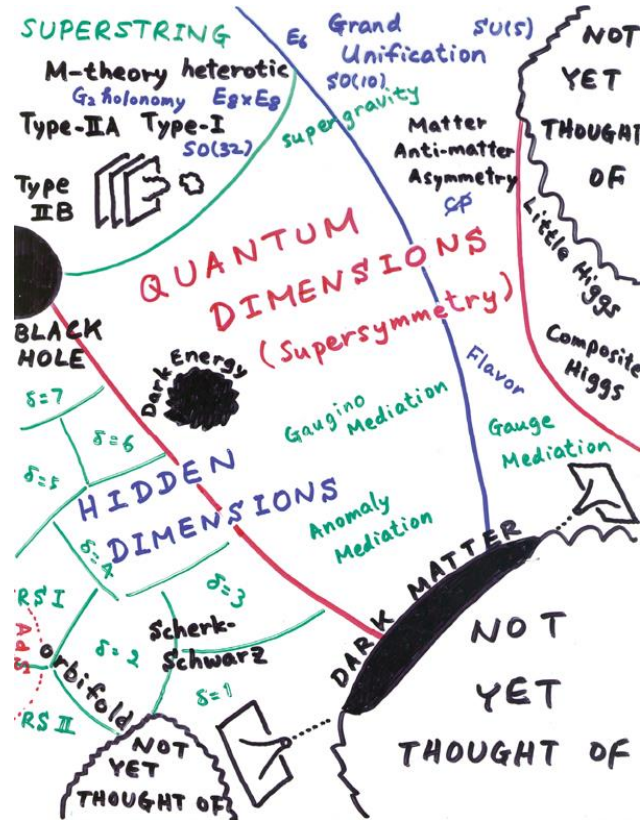
Fokus: Higgs, b-kvarker, top kvarker og naturligvis: nye partikler!

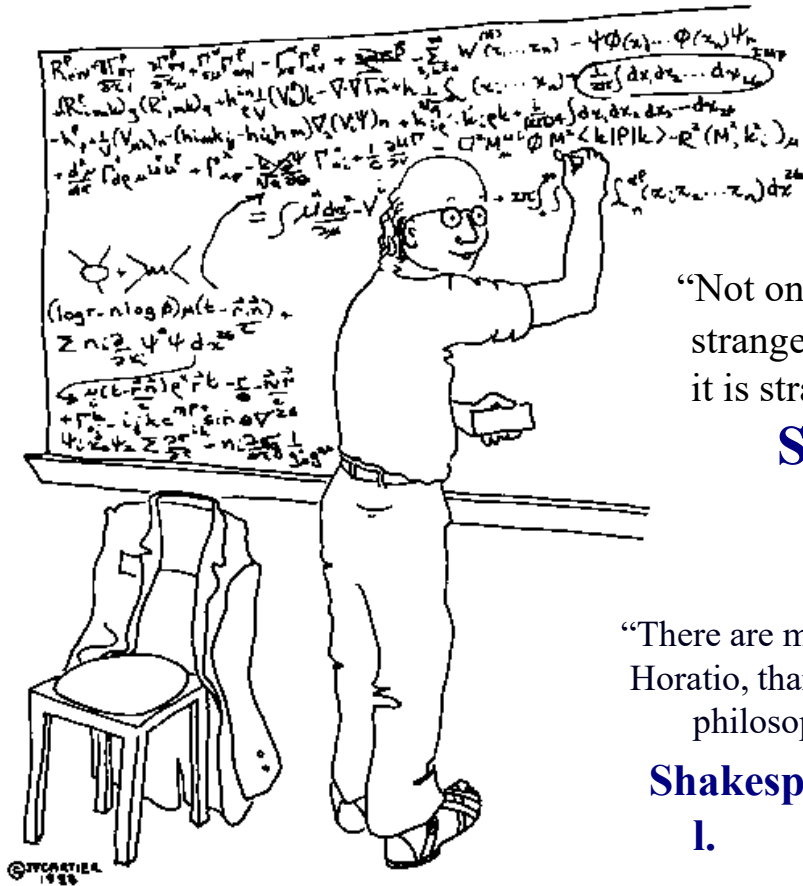


# Hvilken vej har naturen valgt?



Naturen holder kortene godt skjult for os!  
Men vi har mange ideer!





“Not only is the universe stranger than we imagine, it is stranger than we can imagine.”

**Sir Arthur Eddington**

“There are more things in heaven and earth, Horatio, than are dreamt of in our philosophy.”

**Shakespeare, Hamlet, act 1, sc. 5, l.**

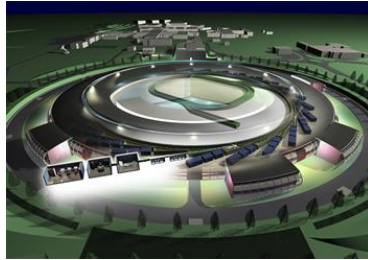
*“At this point we notice that this equation is beautifully simplified if we assume that space-time has 92 dimensions.”*

# Web resourcer

- <http://particleadventure.org/index.html>
  - Specielt designet for et bredt publikum
  - Der er et væld af links - bare klick løs!!
- <http://quarknet.fnal.gov/>
  - Masser af information - om moderne eksperimenter og lærer-materiale
- <https://physicsmasterclasses.org/>
  - En specifik link til undervisningsmæssig beskrivelse af partikelfysik



# CERNs "mission"



Forskning



Forsker træning



Uddannelse

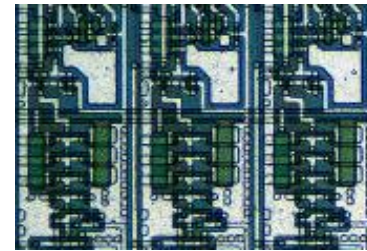
# Partikelfysik "Spin-offs"



Computer



Medicinsk apparatur



Teknologi

# Partikel Fysik og Innovation

- Interface mellem grundforskning og udvikling af den nødvendige teknologi



Verdens første touch-screen



- Teknologi og Innovation



Højenergi partikel beams



Detektering af partikler og kollisionen



IT på meget stor skala (Grid)

# Medicinske Applikationer som Eksempel på Partikel Fysik Spin-off

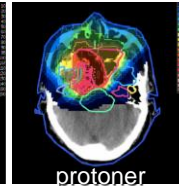
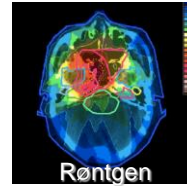
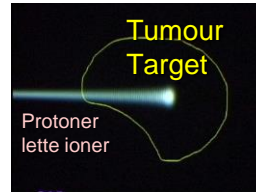
Kombinerer Fysik, IT, Biologi og Medicin for at bekæmpe kræft



**Partikel Acceleratorer**  
~30'000 acceleratorer i verden  
~17'000 til medicinsk brug

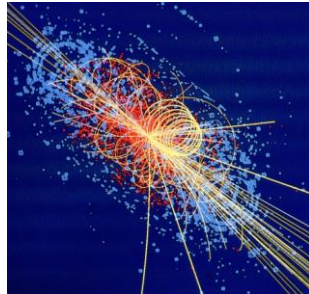


## Hadron Terapi



Førertrøjen i Ion Beam Terapi er i Europa og Japan

>70'000 patienter behandlet globalt (30 faciliteter)  
>21'000 patienter behandlet i Europa (9 faciliteter)



**Detektering af partikler**



## Imaging

Kliniske forsøg i Portugal med nyt bryst imaging system (ClearPEM)



## PET Scann

